

# **Richtungsanalyse von Fasern in Beton und Charakterisierung von rissquerenden Fasern mittels Computer-Tomografie**

Vom Fachbereich  
Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

## **DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

## **DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. (FH) Frank Schuler, M.Eng.**

aus Mutterstadt

Dekan

1.Berichterstatter

2.Berichterstatter

3.Berichterstatter

Tag der mündlichen Prüfung:

Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Prof. i.R. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Schnell

Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens

5. Oktober 2020

Kaiserslautern 2020

(D 386)



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Fachgebieten Massivbau und Baukonstruktion sowie Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern.

Die interdisziplinäre Tätigkeit in den Jahren 2008 bis 2014 zeichnete sich neben den Arbeiten zum Forschungsschwerpunkt „Computer-Tomografie“ durch die Bearbeitung interessanter Forschungsprojekte beider Fachrichtungen aus. Im Jahr 2014 wurde mir die Betreuung des Tätigkeitsfelds „Bauschadensanalyse“ des Fachgebietes Werkstoffe im Bauwesen anvertraut.

Die Förderung meiner Forschungsaktivität setzte sich aus mehreren Teilprojekten zusammen. Der überwiegende Teil der vorliegenden Arbeit wurde im Rahmen des Pilotvorhabens „Innovation und Promotion“ (InnoProm) durch das Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur des Landes Rheinland-Pfalz und durch die Europäische Union aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung gefördert. Besonderer Dank gilt dem Deutschen Beton- und Bautechnik Verein E.V. (DBV) und dem Forschungszentrum „Center for Mathematical and Computational Modelling (CM<sup>2</sup>)“ für die finanzielle Unterstützung der ersten Machbarkeitsstudien sowie dem Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM für die Erstellung der CT-Aufnahmen und die Bereitstellung der Analysesoftware.

Mein Dank gilt beiden Berichterstattern Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit gleichermaßen für die Möglichkeit der Durchführung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und das damit entgegengebrachte Vertrauen sowie die in jeder Hinsicht gewährte Unterstützung.

Weiterhin danke ich dem gesamten Team der Abteilung „Bildverarbeitung“ des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) für die Unterstützung und Ideengebung.

Für die Unterstützung, den Rückhalt und das entgegengebrachte Verständnis möchte ich meiner Familie ganz herzlich danken. Insbesondere ist mein Sohn hervorzuheben, der mir gerade in den letzten Jahren der Bearbeitung die benötigte Ablenkung für eine distanzierte Betrachtung der Forschungsarbeit ermöglichte.

Mutterstadt, im Juli 2020

Frank Schuler





Frank Schuler

**Richtungsanalyse von Fasern in Beton und  
Charakterisierung von rissquerenden Fasern  
mittels Computer-Tomografie**

"Ach, daß der Mensch doch durchsichtig wäre wie eine  
Qualle und daß man den Sitz seiner Leiden schauen könnte."

Wilhelm Conrad Röntgen

"Diese Strahlen des Herrn Röntgen werden sich als Betrug  
herausstellen."

William Thomson, 1. Baron Kelvin

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung . . . . .	v
Abstract . . . . .	v
Bezeichnungen . . . . .	vii
Begriffe . . . . .	xi
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Veranlassung und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Ausgangssituation . . . . .	2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Stahlfaserbeton . . . . .	5
2.1.1 Allgemeines . . . . .	5
2.1.2 Wirkungsweise von Stahlfasern in Beton . . . . .	7
2.1.2.1 Allgemeines . . . . .	7
2.1.2.2 Faserauszug . . . . .	7
2.1.2.3 Faserdehnung . . . . .	9
2.1.3 Einflussfaktoren auf das Nachrissverhalten . . . . .	10
2.1.3.1 Allgemeines . . . . .	10
2.1.3.2 Faserausziehwinkel . . . . .	10
2.1.3.3 Fasergeometrie . . . . .	10
2.1.3.4 Festigkeit der Betonmatrix in Abhängigkeit der Verbund- eigenschaften zwischen Faser und Matrix . . . . .	11
2.1.3.5 Kritische Faserlänge, Einbindelänge und Faserschlank- heit ( $l/d$ ) . . . . .	12
2.1.3.6 Fasermenge . . . . .	12
2.1.3.7 Ausrichtung und Verteilung der Fasern . . . . .	12
2.1.4 Einflussfaktoren auf die Orientierung und Verteilung der Fasern	14
2.1.4.1 Allgemeines . . . . .	14
2.1.4.2 Zusammensetzung des Betons . . . . .	14
2.1.4.3 Betonherstellung und Faserart . . . . .	15
2.1.4.4 Bauteilherstellung . . . . .	16
2.1.5 Faserorientierungsbeiwert . . . . .	17
2.2 Verfahren zur Ermittlung von Faserorientierung und Fasermenge . . . .	22
2.2.1 Einleitung . . . . .	22
2.2.2 Optoanalytisches Verfahren . . . . .	22
2.2.3 Induktives Verfahren . . . . .	24
2.2.4 Computer-Tomografie . . . . .	25
<b>3 Verwendete CT-Aufnahmetechnik</b>	<b>27</b>
3.1 Einleitung . . . . .	27

3.2	Strahlungsquelle . . . . .	27
3.3	Flächendetektor . . . . .	28
3.4	Manipulatoreinheit . . . . .	28
3.5	Durchführung von Aufnahmen und dabei verwendete Parameter . . . .	29
3.6	Optimierung der Aufnahmeparameter . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Be- und Verarbeitung der Bilddaten</b>	<b>35</b>
4.1	Einleitung . . . . .	35
4.2	Bildbearbeitungsfilter . . . . .	35
4.2.1	Mean-Filter . . . . .	35
4.2.2	Median-Filter . . . . .	35
4.2.3	Erosion und Dilatation . . . . .	36
4.2.4	Fill Holes . . . . .	38
4.2.5	Objektfilter . . . . .	38
4.3	Charakterisierung von Objekten . . . . .	38
4.3.1	Allgemeines . . . . .	38
4.3.2	Bounding Box . . . . .	39
4.3.3	Shape Factors . . . . .	41
4.3.4	Maximum Ferret Diameter . . . . .	42
4.3.5	Elongation und Elongation Geodesic Index . . . . .	42
4.3.6	Maximum Local Thickness . . . . .	42
4.4	Segmentierung des Fasersystems . . . . .	43
4.4.1	Binärisierung . . . . .	43
4.4.2	Bildverbesserung . . . . .	45
4.4.3	Visualisierung des Segmentierungsergebnisses . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Richtungsanalyse von Fasern in Beton</b>	<b>51</b>
5.1	Einleitung . . . . .	51
5.2	Globale Analyse des Fasersystems . . . . .	51
5.3	Abgrenzung zu anderen Verfahren . . . . .	52
5.4	Validierung des Analyseverfahrens . . . . .	53
5.4.1	Allgemeines . . . . .	53
5.4.2	Einfluss unterschiedlicher Probeparameter . . . . .	53
5.4.3	Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse . . . .	65
5.5	Zusammenfassung und beispielhafte Anwendungen des Verfahrens . .	67
<b>6</b>	<b>Untersuchung rissquerender Fasern</b>	<b>69</b>
6.1	Einleitung . . . . .	69
6.2	Experimentelles . . . . .	70
6.2.1	Probekörper . . . . .	70
6.2.2	Verwendete Stahlfasern . . . . .	71
6.2.3	Segmentierung . . . . .	72
6.2.4	Labeling . . . . .	75
6.3	Objektsegmentierung von Einzelfasern . . . . .	76
6.3.1	Zielsetzung und Vorgehen . . . . .	76
6.3.2	Visuelle Überprüfung der gelabelten Objekte . . . . .	77
6.3.2.1	Allgemeines . . . . .	77
6.3.2.2	Einzelfasern . . . . .	77

6.3.2.3	Einschlüsse . . . . .	79
6.3.2.4	Objektschar . . . . .	80
6.3.3	Ermittlung von Objekteigenschaften („particle features“) . . . . .	82
6.3.4	Vorfilter zur Detektion von Einzelfasern, Einschlüssen und Objektscharen . . . . .	86
6.3.5	Bearbeitung von Objektscharen . . . . .	88
6.4	Ermittlung von für die Faserwirkung spezifischen Parametern . . . . .	91
6.4.1	Vorbereiten des Datensatzes . . . . .	91
6.4.1.1	Entfernen der Einschlüsse . . . . .	91
6.4.1.2	Selektion der rissquerenden Fasern . . . . .	92
6.4.2	Ermittlung der Faserorientierungsbeiwerte . . . . .	92
6.4.2.1	Allgemeines . . . . .	92
6.4.2.2	Orientierung einzelner Fasern . . . . .	93
6.4.2.3	Orientierung aller im Probenvolumen befindlicher Fasern . . . . .	94
6.4.2.4	Orientierung der rissquerenden Fasern . . . . .	94
6.4.2.5	Orientierung der rissquerenden Fasern in Abhängigkeit der Höhenlage . . . . .	96
6.4.3	Faserverformung . . . . .	97
6.4.4	Einbindelänge . . . . .	97
6.4.5	Verformung der Faserenden . . . . .	99
6.4.6	Gerissene Fasern . . . . .	101
6.5	Schlussfolgerungen . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	103
7.2	Ausblick . . . . .	104
	<b>Literatur</b>	<b>107</b>
	<b>Abbildungen</b>	<b>117</b>
	<b>Tabellen</b>	<b>121</b>
<b>A</b>	<b>Angaben zur verwendeten Betonmischung und Herstellung der Probekörper</b>	<b>123</b>
<b>B</b>	<b>Untersuchung rissquerender Fasern auf Basis der Objektsegmentierung</b>	<b>125</b>
B.1	Visuelle Überprüfung der gelabelten Objekte . . . . .	125
B.1.1	Einzelfasern . . . . .	125
B.1.2	Einschlüsse . . . . .	131
B.1.3	Objektscharen . . . . .	133
B.2	Ermittlung der Objekteigenschaften („particle features“) . . . . .	134
B.3	Visualisierung der 44 rissquerenden Fasern . . . . .	151



## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Verfahren zur Ermittlung der Orientierung und Menge von Stahlfasern in Beton, welches auf einer bildanalytischen Auswertung von Computer-Tomografie-Aufnahmen basiert.

Darauf aufbauend wird die Weiterentwicklung des Verfahrens in Hinblick auf die Charakterisierung von einzelnen Fasern beschrieben. Diese Methode erlaubt mittels der Analyse von für die Faserwirkung spezifischen Parametern eine detaillierte Untersuchung des Stahlfaserbetons nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit. Solche, das Nachrissverhalten maßgeblich beeinflussende Parameter, konnten mit bisherigen Untersuchungsmethoden größtenteils nicht oder nur zerstörend z. B. durch das Aufbrechen der Probekörper und somit verfälscht ermittelt werden.

## **Abstract**

The present work basically describes a method for determining the orientation and quantity of steel fibers in concrete, which is based on an image analysis evaluation of computer tomography recordings.

Building on this, the further development of the method with regard to the characterization of individual fibers is described. This method allows a detailed examination of the steel fiber concrete after exceeding the concrete tensile strength by analyzing parameters specific to the fiber effect. Such parameters, which have a significant influence on the post-cracking behavior, were largely impossible or only destructive with previous investigation methods, e.g. can be determined by breaking the test specimens and misrepresent the results.





## Bezeichnungen

### Große lateinische Buchstaben

$A$	Fläche
$F$	Kraft, Faserorientierung
$G$	Generator
$M$	Mittlere Krümmung
$N$	Anzahl aller die betrachtete Fläche durchdringenden Fasern
$S$	Oberfläche
$V$	Volumen, betrachtetes Volumen, Spannung (Strom), geometrische Vergrößerung

### Kleine lateinische Buchstaben

$d$	Durchmesser
$f$	Betonfestigkeit, Formfaktor
$l$	Länge
$t$	Dicke/Tiefe
$w$	Breite

### Griechische Buchstaben

$\delta$	Verformung/Durchbiegung/Winkel
$\Delta$	Differenz
$\eta$	Faserorientierungsbeiwert
$\kappa$	Faktor zur Berücksichtigung der Bauteilgröße; Beiwert zur Berücksichtigung der Faserorientierung
$\phi$	Vorzugsrichtung
$\Theta$	Winkel

### Griechische Buchstaben mit Indizes

$\delta^f$	Verformungsfaktor einer Faser
$\eta_\phi$	Faserorientierungsbeiwert in Vorzugsrichtung

$\eta_{\Phi,150}$	Faserorientierungsbeiwert in Vorzugsrichtung bei Biegebalken mit einer Höhe von 150 mm
$\eta_{3D}$	Faserorientierungsbeiwert bei dreidimensionaler Ausrichtung der Fasern
$\eta_{2D}$	Faserorientierungsbeiwert bei zweidimensionaler Ausrichtung der Fasern
$\eta_{1D}$	Faserorientierungsbeiwert bei eindimensionaler Ausrichtung der Fasern
$\eta_{\Phi,cr}$	Faserorientierungsbeiwert der rissquerenden Fasern
$\eta_{\Phi,n}$	Faserorientierungsbeiwert einzelner Fasern
$\eta_{\Phi,cr,h}$	Höhenabhängiger Faserorientierungsbeiwert der rissquerenden Fasern
$\kappa_F^f$	Faktor zur Berücksichtigung der Faserorientierung

### Große lateinische Buchstaben mit Indizes

$A_{ct}^f$	Unter Zugspannung stehende zum jeweiligen Gleichgewichtszustand gehörige Querschnittsfläche der gerissenen Bereiche bzw. Fließgelenke in $m^2$
$D_{max}$	Durchmesser des Größtkorns
$D_f$	Brennfleckgröße
$F_i$	Gewicht des jeweiligen Voxels mit dem Wert „1“
$IG_g$	Elongation geodesic index
$K_V$	Dichte des Integrals der totalen Krümmung
$L_V$	Spezifische Faserlänge, tatsächliche Faserlänge
$L_{p,\Phi}$	Projizierte Faserlänge
$L_g$	Maximale geodätische Distanz (elongation)
$M_V$	Dichte des Integrals der mittleren Krümmung
$S_V$	Spezifische Oberfläche
$U_i$	Induzierte Spannung der jeweiligen Messungen über die x-, y-, und z-Achse
$U_f$	Unschärfe
$V_f$	Nominalwert des Fasergehaltes
$V_{ideal}$	Volumen einer ideal dargestellten Faser
$V_{Objekt}$	Volumen eines Objektes
$V_V$	Volumendichte

### Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

$d_f$	Durchmesser einer Faser
-------	-------------------------

$d_m$	Mittlerer Faserabstand
$f_1, f_2, f_3$	Formfaktor
$l_{fb}$	Fasereinbindelänge
$l'_{fb}$	Projizierte Fasereinbindelänge
$l_1, l_2$	Fasereinbindelängen in die jeweiligen Rissflanken
$l_m$	Länge des im Riss befindlichen Fasersegments
$l'_1, l'_2$	Berechnete Einbindelängen
$l_i$	Länge einer Faser
$m_{t,Ziel}$	Tatsächlicher Fasergehalt
$x_i$	Hebelarm eines Voxels
$x_a$	Schwerpunkt

## Abkürzungen

FDA	Abstand Detektor - Strahlungsquelle
FOA	Abstand Strahlungsquelle - Prüfkörper



## **Begriffe**

### **Brennfleck**

Der Brennfleck ist die Auftreffstelle der Elektronen auf der Anode. Sie wird als Schnittfläche des Elektronenstrahlbündels mit der Anodenoberfläche beschrieben.

### **Dilatation**

Die Dilatation ist eine Basisoperation der binären morphologischen Bildverarbeitung und führt grundsätzlich zu einer Vergrößerung von Objekten. Löcher geschlossen und benachbarte Objekte können verschmolzen werden.

### **Duktil**

Duktil oder Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffes, sich unter Belastung plastisch zu verformen, bevor er versagt.

### **Erosion**

Die Erosion ist eine Basisoperation der binären morphologischen Bildverarbeitung. Durch die Erosion werden Objekte grundsätzlich verkleinert und Details entfernt; es kann aber auch geschehen, dass ein zusammenhängendes Objekt getrennt wird.

### **Faserorientierungsbeiwert**

Der Faserorientierungsbeiwert beschreibt den Einfluss der Faserorientierung auf die Wirksamkeit der Faser in eine bestimmte Achsrichtung.

### **Filament**

Glühwendel oder Glühdraht meist aus Wolframdraht zur Emission der Elektronen (Kathode der Röntgenröhre).

### **Geodätischer Bogen**

Die geodätische Krümmung ist ein Begriff aus der klassischen Differentialgeometrie und bezeichnet bei einer Kurve auf einer Fläche die Krümmung dieser Kurve, die in der Fläche gemessen werden kann. Die geodätische Krümmung ist eine von der Fläche abhängige Eigenschaft der Kurve. Sie gehört zur inneren Geometrie der Fläche, d. h. sie kann auch ohne Kenntnis der Krümmung der Fläche im Raum bestimmt werden. Kurven mit der geodätischen Krümmung 0 werden als Geodäten bezeichnet. Sie bilden den kürzesten Abstand zwischen zwei Punkten in der Fläche.

### **Induktionsspule**

Induktionsspulen sind Elektromagnete, Drahtspulen mit oder ohne Ferritkern, die ein Magnetfeld aufbauen, wenn sie von einem elektrischen Strom durchflossen werden.

### **Kalt gezogener Draht**

Draht, der durch enger werdende Ziehdüsen auf den Zieldurchmesser gebracht wird.

### **Kerbspannung**

Diese Spannungen treten an Kerben und Vorsprüngen als eine Konzentration von Spannungen infolge von Kraftumlenkungen auf.

### **Konvexe Hülle**

Für eine Punktmenge in der Ebenen ist die konvexe Hülle, die kleinste konvexe Teilmenge der Ebene, welche alle Punkte enthält. Eine Menge ist konvex, wenn alle gewichteten Mittel von Punkten aus der Menge auch in der Menge liegen.

### **Leistung**

Die elektrische Leistung ( $W$ -Watt) gibt an, wie viel elektrische Arbeit der elektrische Strom in jeder Sekunde verrichtet.

### **Plastische Verformung**

Sind die Belastungen und die dadurch ausgelösten Spannungen im Werkstoff zu groß, kommt es zur plastischen Verformung. Bei der plastischen Verformung kehrt ein Bauteil nicht wieder zu 100% in die ursprüngliche Form zurück. Man spricht hier auch von der Formänderung. Ein Teil der Verformung ist nach wie vor elastisch und somit reversibel, nur ein bestimmter Teil ist plastisch und bleibt dauerhaft bestehen.

### **Rheologie**

Die Rheologie ist die Lehre vom Deformations- und Fließverhalten von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen.

### **Sphärizität**

In der Geologie ist Sphärizität eine Kenngröße dafür, wie kugelförmig ein Körper ist.

### **Spannung**

Die Elektrische Spannung ( $V$ -Volt) ist die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten im elektrischen Feld. Sie ist die treibende Kraft für die Ladungsbewegung.

### **Spezifische Oberfläche**

Die spezifische Oberfläche stellt den Quotienten aus Partikeloberfläche und Volumen eines Partikelkollektivs dar.

### **Spröde**

Spröde beschreibt die Beschaffenheit eines Materials, das hart ist, unbiegsam, nicht dehnbar und leicht bricht.

### **Strahlaufhärtung**

Bei der Durchdringung eines Materials verändern sich die Röntgenstrahlen. Mit Zunahme der Durchdringungstiefe (oder nacheinander zu durchdringende Fasern) erhöht sich die Härte (durchschnittlich Energie) der Photonen. Dies bedeutet eine Verschiebung des Spektrums hin zu höheren Energien.

### **Wechselstrom**

Wechselstrom bezeichnet elektrischen Strom, der seine Richtung (Polarung) in regelmäßiger Wiederholung ändert und bei dem sich positive und negative Augenblickswerte so ergänzen, dass der Strom im zeitlichen Mittel null ist.

# 1 Einführung

## 1.1 Veranlassung und Zielsetzung

Betone unterschiedlichster Art sind hervorragend geeignet Druckspannungen aufzunehmen jedoch ist die Zugfestigkeit dieser Betone wesentlich niedriger und von vielen Parametern abhängig. Gerade bei steigender Druckfestigkeit der Betone ist das Nachbruchverhalten, sprich die Duktilität des Baustoffes, nicht zufriedenstellend. Um die gewünschte Duktilität zu erreichen und dem spröden Bruchverhalten entgegenzuwirken, können Betonen Fasern beigemischt werden. Für die Verbesserung der Festbetoneigenschaften sind die Fasermenge, Faserorientierung und Faserverteilung ausschlaggebend. Dies macht eine Überwachung dieser Parameter notwendig, sei es zur Qualitätssicherung auf der Baustelle oder im Bereich der Forschung zur Weiterentwicklung von Hochleistungsbetonen.

Aufgrund dieser Notwendigkeit wurde der Fokus in der vorliegenden Forschungsarbeit zunächst auf die Entwicklung eines zuverlässigen Werkzeugs zur Analyse der Orientierung und Menge von Fasern in dreidimensionalen Körpern aus Beton gelegt. Die Richtungsanalyse basiert auf der praxisüblichen Verwendung von Faserorientierungsbeiwerten zur Beschreibung der Wirksamkeit der Fasern in einer gewählten Vorzugsrichtung. Gegenüber bisher angewendeten Verfahren, die meist auf der Betrachtung von Schnitt- oder Bruchflächen beruhen, ermöglicht die Analyse von Computertomographie-Aufnahmen die sofortige Auswertung des gesamten Probenvolumens. Des Weiteren bestand die Zielsetzung darin, ein Verfahren bereitzustellen, das im Vergleich zu anderen Untersuchungsmethoden eine schnellere Analyse der gesuchten Parameter ermöglicht und somit die Untersuchung von größeren Serien erlaubt.

Basierend auf den Erkenntnissen der zuvor genannten Untersuchungen konnte die Zielsetzung auf die Untersuchung von Rissbereichen aus in Biegezugversuchen geprüfter Balken erweitert werden. Mithilfe einer Objektsegmentierung sollte eine Charakterisierung der einzelnen Fasern durchgeführt werden. Ziel war hierbei die Ermittlung von für die Faserwirkung spezifischen Parametern, die mit bisherigen Verfahren nicht bzw. nur zerstörend z. B. durch Aufbrechen und somit verfälscht ermittelt werden konnten. Diese maßgeblich das Auszugverhalten aus der Betonmatrix bestimmenden Parameter sollen zum einen zu einem besseren Verständnis des Nachrissverhaltens beitragen und zum anderen Eingangswerte für eine in Zukunft zutreffendere Beschreibung und Bemessung bilden.

### 1.2 Ausgangssituation

Vorangegangene Forschungsarbeiten (beispielsweise von *Illerhaus 2007*) zeigten die grundsätzliche Eignung von Computer-Tomografie-Aufnahmen zur Betrachtung von Fasern in Beton. Jedoch waren diese Verfahren gerade hinsichtlich einer Analyse der Faserorientierung sehr zeitaufwändig und somit für die Bearbeitung von größeren Serien ungeeignet. Die Detektion einzelner Fasern und somit die Möglichkeit diese zu charakterisieren bestand nicht.

Basis für die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen bildet ein vom Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern entwickeltes Programm zur Charakterisierung von Mikrostrukturen in Volumenkörpern. Erste im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführte Machbarkeitsstudien zeigten die grundsätzliche Eignung des Programms zur Richtungsanalyse von Fasern.

Alle im Folgenden vorgestellten Untersuchungen sowie Weiterentwicklungen hinsichtlich Aufnahmetechnik und Analyseverfahren wurden von mir geplant, entwickelt und durchgeführt.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit umfasst insgesamt sieben Kapitel (vgl. Abbildung 1.1).

Nach einer Einführung in **Kapitel 1** liefert **Kapitel 2** zunächst einen Überblick über den Stand der Technik bzw. der Forschung hinsichtlich der Wirkungsweise von Stahlfasern in Beton. Zudem wird der für die vorliegende Arbeit bedeutsame Begriff der „Faserorientierung“ definiert und die für die Beeinflussung der Faserorientierung maßgeblichen Parameter vorgestellt und bewertet. Ferner werden Faserorientierungsbeiwerte aus der Literatur zusammengefasst und eine Übersicht der wichtigsten zur Zeit eingesetzten Messverfahren zur Bestimmung der Faserorientierung und -menge gegeben.

**Kapitel 3** beschreibt die zum Einsatz gekommene Aufnahmetechnik sowie die bei den Aufnahmen verwendeten Parameter und deren Anpassung an die jeweilige Messaufgabe.

Grundlegende Erläuterungen zu der Be- und Verarbeitung der Bilddaten werden in **Kapitel 4** gegeben. Neben der Beschreibung der verwendeten Bildbearbeitungsfilter und der Charakterisierung von Objekten erfolgt abschließend eine Schilderung der Vorgehensweise bei der Segmentierung des Fasersystems. Dieses „Herausfiltern“ der Fasern bildet die Basis für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen.

Die in **Kapitel 5** vorgestellten Arbeiten zeigen die Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens zur Ermittlung der Faserorientierung und -menge in einem Probekörper.

**Kapitel 6** stellt die Entwicklung eines Verfahrens vor, das eine Segmentierung der Einzelfasern erlaubt. Die Einzelbetrachtung der Fasern ermöglicht die Ermittlung von Parametern, die für das Auszugverhalten von Fasern bzw. das Nachrissverhalten von Stahlfaserbeton entscheidend sind.



**Kapitel 7** fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche Automatisierungen innerhalb des entwickelten Verfahrens.

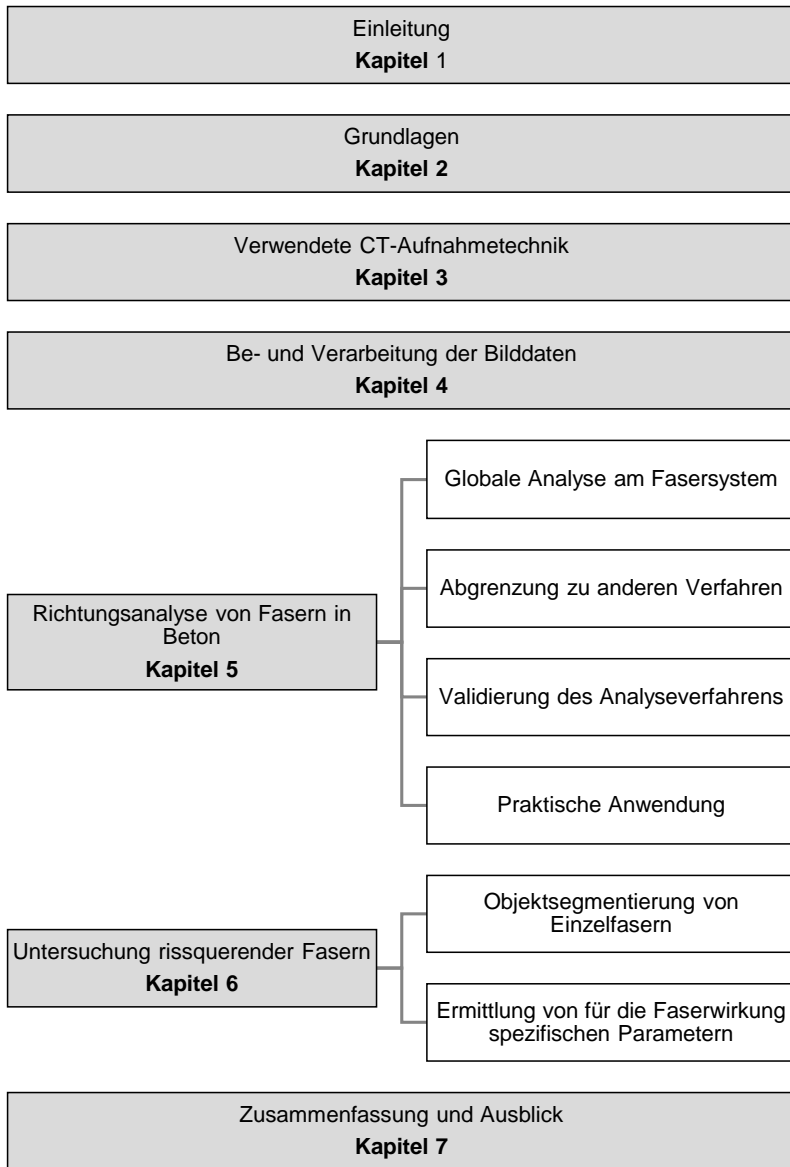


Abb. 1.1: Aufbau der Arbeit



## 2 Grundlagen

### 2.1 Stahlfaserbeton

#### 2.1.1 Allgemeines

Spröde Materialien wie Beton versagen bei Überschreitung der von ihnen aufnehmbaren Zugspannung ohne Vorankündigung. Mit steigender Druckfestigkeit verstärkt sich dieser Effekt. Dieses spröde, schlagartige Versagen gilt es durch geeignete Maßnahmen zu verhindern.

Nach der Entstehung der ersten Risse kann der Beton in geringem Umfang Kräfte über die Kornverzahnung übertragen. Ab einer Rissweite ( $w$ ) von ca. 0,15 mm (in Abhängigkeit des Größtkorns) ist eine Übertragung von Spannungen nicht mehr möglich (vgl. *Holschemacher u. a. 2011a*). Ein Beton ohne zusätzliche Bewehrung versagt schlagartig (vgl. Abbildung 2.1).

Wird der Beton mit Stabstahl bewehrt, spricht man von Stahlbeton. Die Bewehrung übernimmt die Aufnahme von Zugkräften im gerissenen Beton. Über diese geplante gerissene Bauweise wird ein verfestigendes Verhalten nach der Rissbildung erreicht (vgl. Abbildung 2.2).

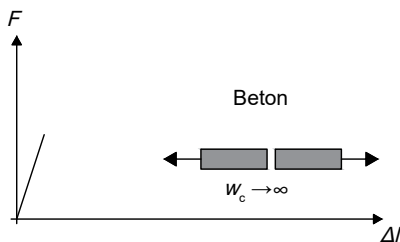


Abb. 2.1: Last-Verformungsverhalten von Beton, vereinfachte Darstellung nach DAfStb 2012

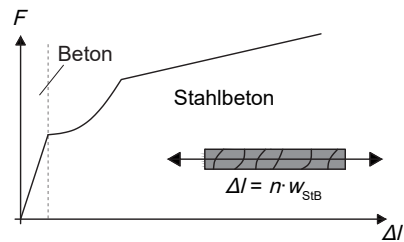


Abb. 2.2: Last-Verformungsverhalten von Stahlbeton, vereinfachte Darstellung nach DAfStb 2012

Bei einem Beton, dem als Bewehrung Stahlfasern hinzugegeben wurden, wird in der Regel ein entfestigendes Verhalten mit einem duktilen Tableau in der Last-Verformungskurve angestrebt (vgl. Abbildung 2.3). Unter Verwendung von hohen Faserdosierungen oder „speziellen“ Fasern (vgl. Abschnitt 2.1.2.3) ist jedoch auch eine Erhöhung der Auszuglast nach dem Erstriss möglich (vgl. Abbildung 2.4).

Bereits in den 1870er Jahren wurde die Zugabe von Stahlabfällen zur Verbesserung der Betonzugfestigkeit durch *A. Berard* zum Patent angemeldet. Das erste Patent auf

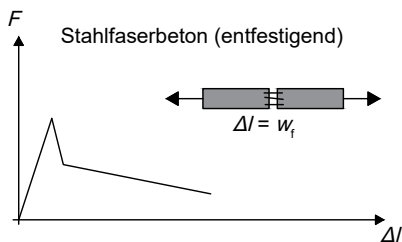


Abb. 2.3: Last-Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton (entfestigendes Verhalten), vereinfachte Darstellung nach DAfStb 2012

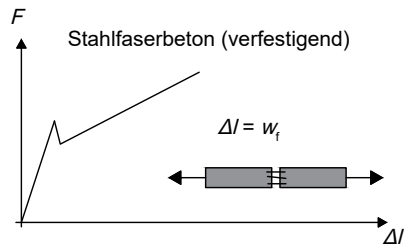


Abb. 2.4: Last-Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton (verfestigendes Verhalten), vereinfachte Darstellung nach DAfStb 2012

eine gerade Stahlfaser wurde im Jahr 1918 durch *H. Alfzen* eingereicht. Erste Bemessungsregeln für Stahlfaserbeton entstammen den 1970er und 1980er Jahren. Jedoch war Stahlfaserbeton in einer deutschen Norm hinsichtlich der Bemessung bisher nicht geregelt. Die einschlägigen Merkblätter des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins E.V. (vgl. *DBV 2001* und *DBV 2004*) entsprachen zwar dem Stand der Technik, jedoch benötigte man aufgrund dieser Regelungen für eine statisch-konstruktive Anwendung eine Zustimmung als Bauprodukt durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) oder eine Zulassung im Einzelfall. Seit der bauaufsichtlichen Einführung der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) im Jahr 2001 (aktuelle Fassung *DAfStb 2012*) ist es möglich, Stahlfaserbeton im Rahmen der in der Richtlinie definierten Anwendungsgrenzen ohne gesonderte Zulassung zu verwenden.

Das Hauptanwendungsgebiet des Stahlfaserbetons liegt zurzeit jedoch immer noch im Bereich der nicht-tragenden Bauteile. Der Industriebodenbau dominiert mit fast 70 % Marktanteil den Stahlfaserbetonmarkt (vgl. *Falkner u. Grunert 2011*). Hier ist mithilfe von lasergesteuerten Flächenfertigern eine Tagesleistung von mehr als 2.000 m<sup>2</sup> möglich. Des Weiteren findet Stahlfaserbeton Einsatz im Bereich von Betonstraßen, im Wohnungsbau (Bodenplatten, Fundamente und Kellerwände) oder bei der Herstellung von Fertigteilen, wie z. B. Tunneltübbings, Rohren oder Elementwänden.

Gebräuchliche Stahlfasertypen für den Einsatz in Beton sind Blechfasern, gefräste Stahlfasern und Stahldrahtfasern mit unterschiedlichen geometrischen Formen. Beschränkt wird die Auswahl im Geltungsbereich der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ (*DAfStb 2012*) auf Fasern mit einer hohen Leistungsfähigkeit, für deren Verwendung ausreichende Erkenntnisse aus Faser- und Bauteilzulassungen vorliegen. Demnach handelt es sich um kaltgezogene Stahldrahtfasern mit formschlüssiger, mechanischer Verankerung gemäß *DIN EN 14889-1:2006* des Systems 1 (vgl. Abbildung 2.5).

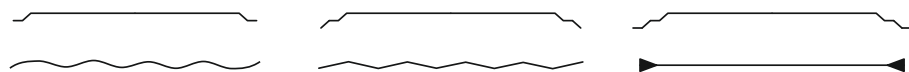


Abb. 2.5: Stahlfaserformen gemäß DAfStb 2015

## 2.1.2 Wirkungsweise von Stahlfasern in Beton

### 2.1.2.1 Allgemeines

Bezüglich der Faserwirkung werden zwei grundsätzliche Wirkmechanismen unterschieden. In der Regel ist ein duktiles Bauteilverhalten erwünscht. Dieses Verhalten wird durch das Ausziehen der Fasern aus der Matrix erreicht (vgl. Abbildung 2.6, ①).

Unter Verwendung von hochfesten und dehnfähigen Fasern kann das Dehnungspotenzial der Fasern ausgenutzt werden (vgl. Abbildung 2.6, ②). Infolge einer festen Verankerung (durch spezielle Faserenden, z. B. mehrfache Aufbiegungen) in der Betonmatrix werden die Fasern nicht ausgezogen. Diese Variante ist in der Regel mit einem verfestigenden Verhalten verbunden.

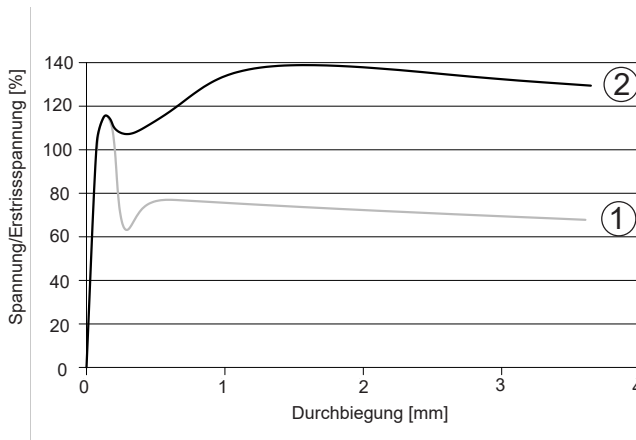


Abb. 2.6: Verhalten eines Stahlfaserbetons unter Biegezugbeanspruchung (nach *Bekaert 2012*)

- ① normalfeste Fasern mit normaler Dehnpazität und einfacher Verankerung der Fasern
- ② hochfeste Fasern mit hoher Dehnpazität und voller Verankerung der Fasern

### 2.1.2.2 Faserauszug

Im Folgenden wird die Funktionsweise eines Stahlfaserbetons anhand der Vorgänge bei der Ausbildung eines Risses unter Biegezugbeanspruchung erläutert. Vorausgesetzt wird der Regelfall, dass die Fasern aus der Betonmatrix ausgezogen werden.

Die Zugabe von Stahlfasern beeinflusst unter theoretischen Gesichtspunkten die Zugfestigkeit des Betons auf zwei Arten. Zum einen erhöhen die Stahlfasern den Elastizitätsmodul der Betonmatrix, sodass die aus den unterschiedlichen Elastizitätsmoduli der Zementsteinmatrix und der Gesteinskörnung resultierenden, an den Kornoberflächen auftretenden Spannungskonzentrationen reduziert werden. Zum anderen werden die an den Risswurzeln der entstehenden Mikrorisse auftretenden Kerbspannungen

teilweise durch die Stahlfasern aufgenommen. Experimentelle Untersuchungen zeigen Festigkeitssteigerungen von 10 % bis 20 % durch die Faserzugabe (Müller u. Wiens 2016).

Ab einer Rissweite von ca. 0,15 mm können über die Kornverzahnung keine Spannungen mehr übertragen werden (Holschemacher u. a. 2011a). Es kommt zunächst zu einem Spannungsabfall. Die Fasern werden „aktiviert“. Die rissquerenden Fasern übernehmen die Übertragung der resultierenden Spannung von einem Rissufer zum anderen. Ausschlaggebender Faktor ist hier der Verbund der Faser zur Betonmatrix (Haftverbund), der einen Widerstand gegen das Herausziehen der Faser bildet. Vorteilhaft für einen hohen Auszugswiderstand ist das Vorhandensein einer möglichst großen Oberfläche der verwendeten Faser, die einen Verbund eingehen kann (z. B. raue Faseroberfläche oder großes Verhältnis zwischen Länge und Dicke der Faser ( $l/d$ -Verhältnis)).

Nach dem Verlust des Haftverbundes werden die Fasern ausgezogen und der Reibungsverbund sowie ein eventuell vorhandener Formverbund behindern den Auszug der Fasern. Im Fall der Verwendung von Fasern mit Endaufbiegungen entstehen beim Ausziehen einer Faser aus dem Auszugskanal an den Umlenkpunkten der Aufbiegungen Fließgelenke. Über diese plastische Verformung wird der Widerstand gegen das Ausziehen zusätzlich erhöht (vgl. Robins u. a. 2002).

Abbildung 2.7 zeigt eine schematische Darstellung (nach Ghoddousi u. a. 2010) des Auszugs einer Faser mit Endaufbiegungen aus der Betonmatrix. Der aufsteigende Bereich 0-a ergibt sich aus der adhäsiven Kraftübertragung (Haftverbund) zwischen Faser und Betonmatrix. Dieser adhäsive Verbund führt bei ansteigender Auszugskraft zu einer gleichgroßen Verformung von Faser und Matrix. Der Teilbereich a-b zeigt den Beginn des sogenannten „debonding“, das die Überschreitung der Haftfestigkeit beschreibt. Nach dem Verlust des Haftverbundes (b) wird die maximal aufnehmbare Spannung durch den Formverbund der Faser bestimmt (b-c). Beim Erreichen der maximalen Auszugslast werden die Biegepunkte der Faser plastisch verformt (c-d) und es kommt zunächst zu einem Abfall der Auszugskraft. Infolge der plastischen Verformung (Kaltverformung) der Biegepunkte und dem Reibungswiderstand wird ein nochmaliger Anstieg der Auszugskraft erreicht (d-e). Sobald sich die beiden bereits verformten Biegepunkte über dem zweiten Umlenkpunkt befinden, wird der Auszug nur noch durch den Reibungswiderstand bestimmt (e-f).

Im Bereich der Umlenkpunkte der Fasern, die den Riss nicht senkrecht queren, entstehen Reibungskräfte, die einen zusätzlichen Auszugswiderstand bilden. Dieser Effekt kann aber zu einem sprunghaften Anstieg der Faserspannung führen, sodass die Faser reißt. Ebenfalls ist der Bruch der Betonmatrix möglich. Weiterführende Erkenntnisse zum Einfluss des Auszugswinkels können beispielsweise Pfyl 2003 entnommen werden.

Unter der Annahme, dass die Fasern unter Biegebeanspruchung des Bauteils aus der Betonmatrix ausgezogen werden, geben die außenliegenden Fasern bei Zunahme der Rissweite langsam die Spannungen an die weiter innenliegenden Fasern weiter. Durch dieses Verhalten wird das meist erwünschte duktile Verhalten erreicht. Das Versagen tritt durch vollständigen Auszug der Fasern auf.

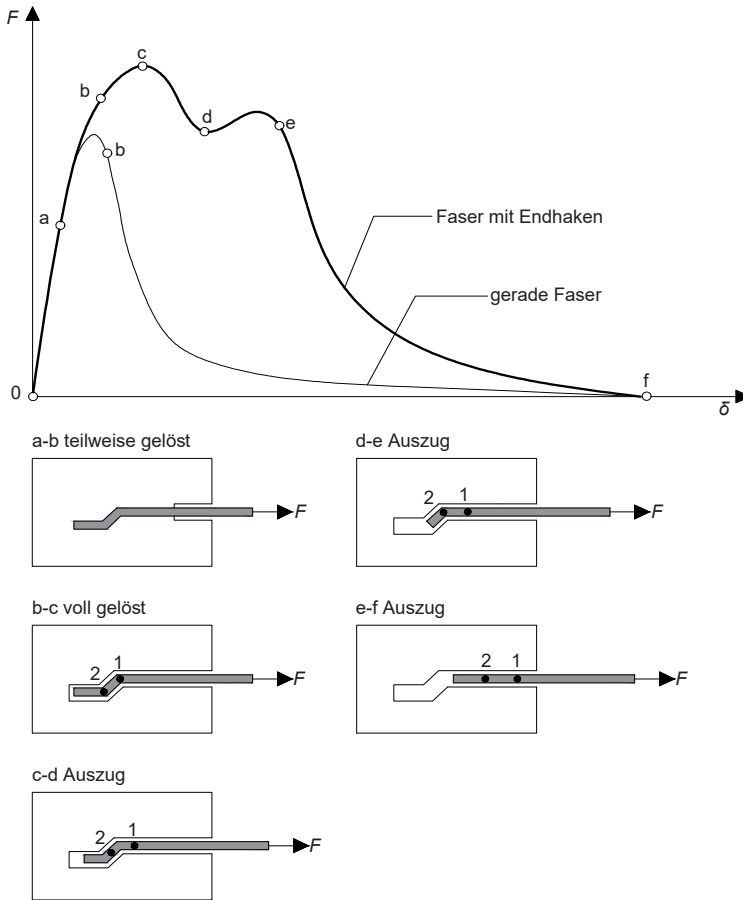


Abb. 2.7: Auszugverhalten von Stahlfasern mit Endaufbiegungen (nach Ghoddousi u. a. 2010)

Beim Reißen von Fasern besteht die Gefahr eines Reißverschluss-Effektes. Hierbei werden die Kräfte schlagartig von den außenliegenden Fasern (große Rissweite) auf die innenliegenden Fasern (kleine Rissweite) umgelagert. Es kommt zu einem schlagartigen Versagen ohne Vorankündigung durch große Verformungen.

### 2.1.2.3 Faserdehnung

Besitzen die verwendeten Fasern eine besonders hohe Dehnfähigkeit, kann die Längenänderung der Faser ausgenutzt werden. Hierzu muss die Faser jedoch fest in der Betonmatrix verankert sein, sodass ein Ausziehen verhindert wird. Diese Verankerung kann durch zusätzliche Formgebungen der Faserenden erfolgen. Neben einer hohen Dehnapazität müssen die für derartige Fasern verwendeten Drähte eine hohe Zugfestigkeit aufweisen.

### 2.1.3 Einflussfaktoren auf das Nachrissverhalten

#### 2.1.3.1 Allgemeines

Das Verhalten eines Stahlfaserbetons im Nachrissbereich wird maßgeblich durch die Art, die Menge, die Verteilung und die Ausrichtung der zugegebenen Fasern bestimmt. Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über die wichtigsten Parameter, die das Nachrissverhalten beeinflussen und auf die Eigenschaften der Fasern und deren Verbundverhalten zurückzuführen sind.

#### 2.1.3.2 Faserausziehwinkel

Durchdringt eine dünne, biegsame Faser den sich einstellenden Riss nicht unter einem rechten Winkel, entsteht in Abhängigkeit der Eigenschaften der verwendeten Faser und der sie umgebenden Matrix im Bereich der Rissflanken eine Umlenkkraft (vgl. *Leung u. Li 1992*). Im Bereich der Faserumlenkung entstehen höhere Reibungskräfte, was zu einem sprunghaften Anstieg der Faserspannung im Bereich der Rissufer führt. Dies kann zum Reißen der Faser führen (vgl. *Brandt 1985*). Aufgrund der Spannungskonzentration an der Stelle des Faseraustritts ist ein Versagen der Betonmatrix möglich (vgl. *Lin 1999*). Die zuvor beschriebene erhöhte Auszugslast durch das Ausziehen unter plastischer Verformung der Faserenden kann durch das Matrixversagen (Verminderung der Einbindelänge) reduziert werden. Betrachtet man beispielsweise die Arbeiten von *Banthia u. Trottier 1994* zeigt sich für Stahlfasern mit Aufkröpfung der Faserenden ( $d = 0,8 \text{ mm}$ ) mit einer beidseitigen Einbindelänge von 30 mm und Auszugswinkeln  $< 45^\circ$  ein Abplatzen der Matrix. *Pfyl 2003* bemerkt hierzu, dass dieses Verhalten auf die beidseitig „optimale“ und relativ lange Einbindelänge zurückzuführen ist.

#### 2.1.3.3 Fasergeometrie

Die gebräuchlichsten Lieferformen für Stahldrahtfasern sind gerade, gewellte oder mit Nadelköpfen oder Endaufbiegungen versehene Fasern. Abbildung 2.8 (nach *Strack 2007*) veranschaulicht anhand von Kraft-Durchbiegungs-Kurven von Stahlfaserbetonbalken unter Biegebeanspruchung den Einfluss der Fasergeometrie auf die Leistungsfähigkeit des Stahlfaserbetons, auch nach Überschreitung dessen Biegezugfestigkeit.

Ein Beton ohne zusätzliche Verstärkung versagt spröde ohne nennenswerte Verformung, die das Versagen ankündigt (vgl. Abbildung 2.8, ①).

Glatte, gerade Fasern werden nach Verlust des Haftverbundes über Reibungskräfte zwischen Faser und Betonmatrix ausgezogen (vgl. Abbildung 2.8, ②). Mit zunehmender Rissbreite verringert sich die Einbindelänge und somit die wirksame Oberfläche, was sich in der näherungsweise linearen Abnahme der aufnehmbaren Kraft ausdrückt.

Stahlfaserbetone mit geometrisch veränderten Fasern hingegen zeigen im Nachrissbereich einen weniger starken Abfall der aufnehmbaren Kraft. Dies lässt sich durch die plastische Verformung der Endaufbiegungen (vgl. Abbildung 2.8, ④) und die vergrößerte Einbindelänge bei einer gewellten Form erklären (vgl. Abbildung 2.8, ③). Bei der



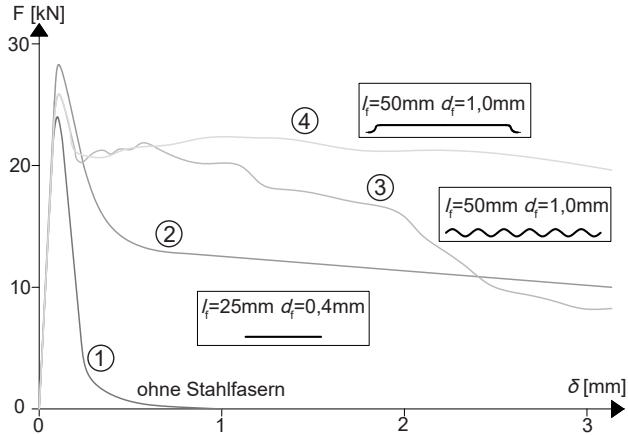


Abb. 2.8: Einfluss unterschiedlicher Fasergeometrien auf das Tragverhalten (Biegebalken) (nach Strack 2007)

Verwendung von Fasern mit Endverankerungen kann aufgrund der plastischen Verformung der Faserenden beim Auszug eine Laststeigerung mit anschließendem „duktilem“ Tableau der Kraft-Durchbiegungskurve beobachtet werden (vgl. Abbildung 2.8, ④). Bei größeren Rissweiten zeigen Betone mit gewellten Fasern einen kontinuierlichen Abfall der aufnehmbaren Kraft. Begründet wird dies durch die vergrößerte Einbinde-länge und die starke mechanische Verankerung. In den am stärksten beanspruchten Randbereichen wird die Zugfestigkeit der Fasern überschritten und es kommt zum Reißen der Fasern. Folglich kommt es zu einem Reißverschlussseffekt. Aufzunehmende Spannungen, die von außen liegenden Fasern aufgrund des bereits erfolgten Versagens nicht mehr aufgenommen werden können, werden an weiter innenliegende Fasern übergeben.

#### 2.1.3.4 Festigkeit der Betonmatrix in Abhängigkeit der Verbundeigenschaften zwischen Faser und Matrix

Die aus der Entstehung der plastischen Gelenke resultierende Erhöhung der Auszugslast kann durch die an den Umlenkstellen entstehenden Spannungskonzentrationen und dem daraus resultierenden Matrixversagen reduziert werden (vgl. *Banthia u. Trottier 1994*). Das Matrixversagen und das für ein duktilen Materialverhalten zu vermeidende Reißen der Faser bei Überschreitung der Stahlzugfestigkeit werden durch die Zug- bzw. Druckfestigkeit des Betons beeinflusst. Daraus resultiert die Notwendigkeit der Festlegung einer Mindestbetondruckfestigkeit zur Vermeidung von Matrixausbrüchen und einer maximalen Betondruckfestigkeit zur Beschränkung eines zu guten Haftverbundes (der das Ausziehen der Faser verhindert) in Abhängigkeit der verwendeten Faserart und deren Eigenschaften.

### 2.1.3.5 Kritische Faserlänge, Einbindelänge und Faserschlankeit ( $l/d$ )

Maßgebend für die Verbundeigenschaften und damit auch für die maximal aufnehmbaren Kräfte ist die zur Verfügung stehende Faseroberfläche entlang der gesamten Einbindelänge. Je besser der Verbund zwischen Faser und Betonmatrix, desto höher die zum Ausziehen der Faser benötigte Auszugskraft. Die kritische Faserlänge beschreibt den Gleichgewichtszustand zwischen maximaler Auszugskraft und der vom Faserquerschnitt aufnehmbaren Kraft, die durch die Zugfestigkeit des Fasermaterials beschränkt wird (vgl. *Naaman u. a. 1991*). Ist die Auszugskraft kleiner als die von der Faser aufzunehmende Kraft, wird die Faser ausgezogen. Andernfalls reißt die Faser. Qualitativ gesehen steigt die maximal aufnehmbare Spannung mit zunehmender Schlankheit der Faser. Jedoch steigt mit zunehmendem  $l/d$ -Verhältnis bei gleichzeitig zunehmender Verbundspannung auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Faser reißt.

### 2.1.3.6 Fasermenge

Im Wesentlichen ist die Verbesserung des Nachrissverhaltens von Stahlfaserbeton von der Menge der Fasern im gezogenen Querschnitt abhängig (vgl. *Lingemann u. Zilch 2013*), d. h. von der Anzahl und der Ausrichtung der risskreuzenden Fasern, die zur Kraftübertragung beitragen.

In Folge dessen ist für die Verbesserung der Festbetoneigenschaften eine bestimmte Mindestfasermenge erforderlich. Jedoch wird die maximal beimischbare Menge durch die sich verschlechternden Frischbetoneigenschaften begrenzt. Ab einer bestimmten Menge lassen sich die Fasern nicht mehr homogen im Frischbeton verteilen. Es kommt zu einer Ansammlung von Fasern (vgl. *Holschemacher u. a. 2011a*), den sogenannten Faserigeln. Praxisübliche Fasermengen liegen zwischen  $25 \text{ kg/m}^3$  und  $100 \text{ kg/m}^3$ .

### 2.1.3.7 Ausrichtung und Verteilung der Fasern

Wie zuvor beschrieben, bestimmt der Winkel, unter dem eine Faser aus der Matrix ausgezogen wird, maßgeblich den Widerstand gegen das Ausziehen. Für die Kraftübertragung im Nachrissbereich ist es aber auch von entscheidender Bedeutung, wie die Fasern im Querschnitt verteilt sind.

Der Einfluss der Orientierung und der Verteilung der Fasern wird mithilfe des folgenden Beispiels verdeutlicht. Tabelle 2.1 zeigt die Einzelprüfergebnisse zweier Proben, die einer Serie von sechs auf Nachrissbiegezugfestigkeit geprüfter Balken entstammen. Es handelt sich um die Probe mit der niedrigsten (Probe 1) und höchsten (Probe 2) Nachrissbiegezugfestigkeit  $f_{\text{cf},L1}^f$  bzw.  $L2$ .

Trotz höherer Fasermenge in Probe 1 (vgl. Abbildung 2.9) wurden wesentlich geringere Nachrissbiegezugfestigkeiten gegenüber Probe 2 (vgl. Abbildung 2.10) gemessen. Es zeigt sich, dass durch die stärkere Ausrichtung der Fasern parallel zur Zugkraftichtung (angezeigt durch den höheren Faserorientierungsbeiwert  $\eta_\phi$  in Richtung x) und der Ansammlung von Fasern im unteren Bereich bei Probe 2 (vgl. Abbildung 2.10) höhere Nachrissbiegezugfestigkeiten erreicht werden können.

Tab. 2.1: Einzelprüfergebnisse zweier Proben; Fasermenge, Faserorientierung für die Achsrichtungen (Vorzugsrichtungen), Nachrissbiegezugfestigkeiten L1 und L2

Probekörper	Fasermenge [kg/m <sup>3</sup> ]	Faserorientierungsbeiwert $\eta_\varphi$			$f_{\text{cfl},L1}^f$	$f_{\text{cfl},L2}^f$
		x	y	z	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Probe 1	22	0,57	0,31	0,60	2,20	0,84
Probe 2	18	0,71	0,29	0,45	3,41	2,13

Für eine bessere Darstellbarkeit wurden für die Abbildungen 2.9 und 2.10 Bildausschnitte aus dem gesamten Rissbereich ausgewählt. Es handelt sich jeweils um einen Ausschnitt aus dem unteren Bereich des Risses, in dem die größten Zugkräfte auftreten.

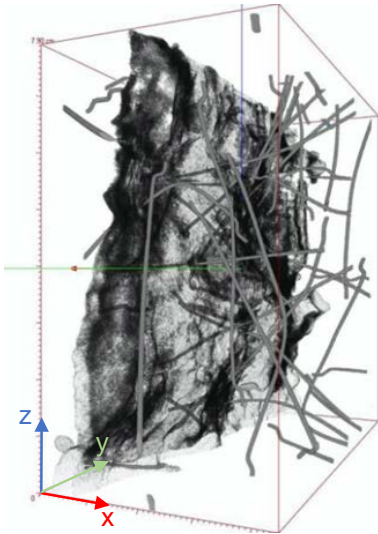


Abb. 2.9: Visualisierter Rissbereich (Bildausschnitt ca. 30 x 70 x 70 mm<sup>3</sup>), gekröpfte Stahlfaser, Stahlfasergehalt ca. 22 kg/m<sup>3</sup>, Faserorientierungsbeiwert: x = 0,57, y = 0,31, z = 0,60 (vgl. Schuler 2010)

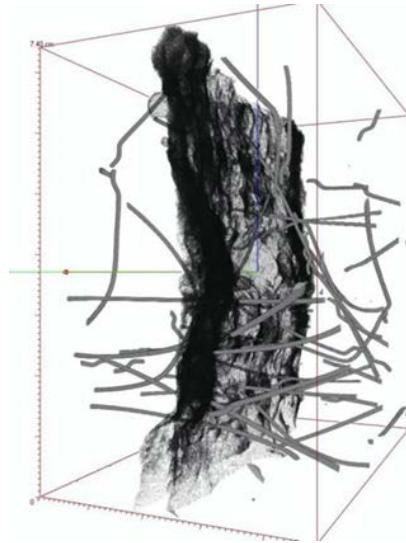


Abb. 2.10: Visualisierter Rissbereich (Bildausschnitt ca. 30 x 70 x 70 mm<sup>3</sup>), gekröpfte Stahlfaser, Stahlfasergehalt ca. 18 kg/m<sup>3</sup>, Faserorientierungsbeiwert: x = 0,71, y = 0,29, z = 0,45 (vgl. Schuler 2010)

### 2.1.4 Einflussfaktoren auf die Orientierung und Verteilung der Fasern

#### 2.1.4.1 Allgemeines

Ausschlaggebend für das Verhalten eines Stahlfaserbetons im Nachrissbereich sind die Menge, die Ausrichtung und die Verteilung der Fasern im gerissenen Querschnitt.

Unter Faserverteilung versteht man die zahlenmäßige Verteilung der Fasern innerhalb eines bestimmten Volumens (vgl. *Rosenbusch 2004*). Die Faserorientierung gibt die Ausrichtung der Fasern im Bauteil an.

Wie im Folgenden erläutert, kann es in Abhängigkeit einer Vielzahl von Einflussfaktoren zu einer eindimensionalen, zweidimensionalen oder dreidimensionalen Orientierung der Fasern innerhalb eines Bauteils kommen (vgl. Abbildung 2.11).

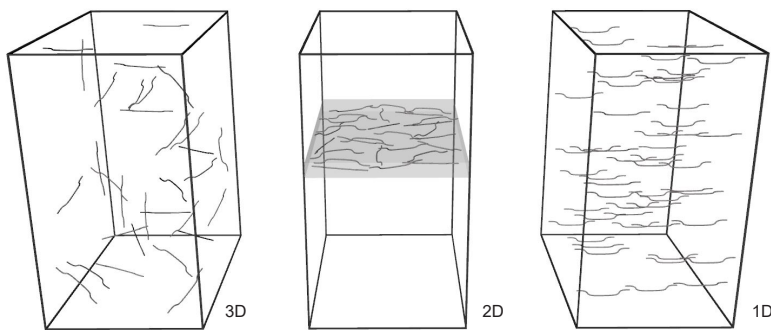


Abb. 2.11: Ausrichtung von Fasern in Beton (nach *Holschemacher u. a. 2011a*)

#### 2.1.4.2 Zusammensetzung des Betons

Einen wesentlichen Einfluss auf die Verteilung und Ausrichtung der Fasern hat die Zusammensetzung des Betons. Hier wird im Folgenden insbesondere auf den Feinkornanteil und das verwendete Größtkorn eingegangen.

Der Feinkornanteil bestimmt in Verbindung mit dem Bindemittelanteil und der Wassermenge die Konsistenz des Frischbetons. Bei einer zu weichen Konsistenz neigen die Fasern zum Absinken. Ist jedoch der Frischbeton zu steif, können sich die Fasern nicht gleichmäßig verteilen und die Verarbeitbarkeit wird verschlechtert. Ziel ist also die Einstellung einer Konsistenz, die eine gute Verarbeitbarkeit (Mischen, Einbringen, Verdichten) des Frischbetons und eine gleichmäßige Verteilung der Fasern im Bauteil erlaubt.

Das Größtkorn sowie die Sieblinie der Gesteinskörnung beeinflussen die Beweglichkeit der Fasern. Ein zu großes Größtkorn behindert die Bewegungsfreiheit der Fasern (vgl. *Mathews u. Lub 1983*). Abbildung 2.12 illustriert diesen Effekt. Können sich die

Fasern nicht mehr frei um die Gesteinskörnung bewegen, kann es durch „zusammengeschobene“ Fasern zu einer Igelbildung kommen.

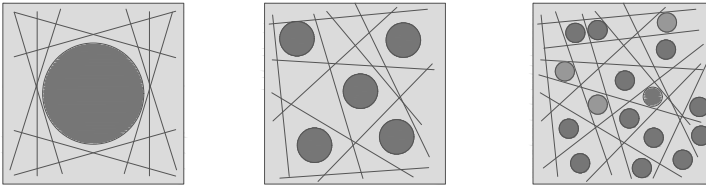


Abb. 2.12: Einfluss des Größtkorns auf die Beweglichkeit der Fasern nach Mathews u. Lub 1983

Der Durchmesser des Größtkorns  $D_{\max}$  sollte nicht größer als der mittlere Faserabstand sein (vgl. Romualdi u. Mandel 1964). Idealerweise liegt die Faserlänge im Bereich des 1,5 bis 4-fachen des Größtkorndurchmessers (vgl. Müller u. Wiens 2016 und DAfStb 2012). Nach Romualdi u. Mandel 1964 lässt sich der mittlere Faserabstand  $d_m$  nach Gleichung 2.1 bestimmen.

$$d_m = \frac{122 \cdot d}{\sqrt{V_f}} \geq D_{\max} \quad (2.1)$$

Mit:

$d_m$ :	mittlerer Faserabstand in mm
$d$ :	mittlerer Faserdurchmesser in mm
$V_f$ :	Nominalwert des Fasergehaltes in kg/m <sup>3</sup>
$D_{\max}$ :	Größtkorn der Gesteinskörnung in mm

Die Zugabe von Fasern verändert die Packungsdichte des Betons (vgl. Rossi 1994). Eine Erhöhung der Fasermenge sowie eine Reduzierung des Gehalts an feinen Gesteinskörnung haben einen negativen Einfluss auf die Packungsdichte (vgl. Bartos u. Hoy 1996). Nach Maidl 1991 muss die Zugabe der Fasern in der Mischungsberechnung berücksichtigt werden. Eine Steigerung des Feinkornanteils erhöht über die Einbettung der Faser in die feineren Bestandteile der Gesteinskörnung zum einen die Beweglichkeit der Fasern, zum anderen wird die Packungsdichte erhöht. Beispielsweise wurden in den Untersuchungen von Martinie u. a. 2010 zur Erreichung der gewünschten Verarbeitbarkeit und Packungsdichte gegenüber der Mischung ohne Stahlfasern der Feinkornanteil um 20 % erhöht und der Größtkornanteil um 10 % reduziert.

#### 2.1.4.3 Betonherstellung und Faserart

Werden große Mengen Fasern zeitgleich in den Mischer gegeben, besteht eine erhöhte Neigung zur Igelbildung. Dies gilt ebenfalls für Betone, die mit Fasern einer hohen Schlankheit ( $l/d \geq 60$ ) (vgl. Yaziki u. a. 2007) und/oder einer für die Verarbeitung ungünstig veränderten Geometrie (z. B. gewellte Fasern) hergestellt werden (vgl. Soroushian u. Bayasi 1991). Bedingt durch die Ansammlung von Fasern entstehen lokal

Bereiche, in denen der angestrebte Fasergehalt über- oder unterschritten wird. Dem kann über die Art der Zugabe der Fasern entgegen gewirkt werden (vgl. *Hadl u. Tue 2016*). Idealerweise werden die Fasern vereinzelt beim Mischvorgang zugegeben. Die Zugabe kann per Hand direkt aus der Verpackung in den Mischer erfolgen. Dies ist aber sehr aufwändig. Daher werden die Fasern meist mittels Einblasegerät oder Förderband mit Rütteltrichter zugegeben. Eine weitere Möglichkeit ist die Zugabe der Fasern in die laufende Mischtrommel des Transportfahrzeuges. Aufgrund der Tatsache, dass die Fasern schon vor dem Einbringen zur Bildung von Faserigeln neigen, bietet sich die Verwendung von miteinander verklebten Fasern an, deren Verklebung sich erst beim Kontakt mit dem Zugabewasser löst und so eine gleichmäßige Verteilung der Fasern ermöglicht.

### 2.1.4.4 Bauteilherstellung

Grundsätzlich ist eine Beeinflussung der Ausrichtung der Fasern beim Betoniervorgang auch durch die gewählte Einbring- bzw. Fließrichtung des Frischbetons und des Verdichtungsvorgangs möglich. Eine solche Beeinflussung ist aber nur bei einem fließfähigen Beton und einer ausreichend langen Fließstrecke möglich (vgl. *Ferrara u. a. 2011*). Am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführte Untersuchungen zu den rheologischen Eigenschaften von Feinkornbetonen mit und ohne Stahlfaserzugabe (vgl. *Heese u. a. 2012* und *Heese 2013*) bestätigen diese Beobachtungen.

Neben den bereits in den Abschnitten 2.1.4.2 und 2.1.4.3 erläuterten Parametern bezüglich der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons spielen die Einflüsse der Schalungsflächen und die Bauteilabmessungen eine entscheidende Rolle bei der Ausrichtung der Fasern. Im Bereich von Begrenzungsflächen (Schalungsflächen und Betonieroberseite) neigen die Fasern zu einer zweidimensionalen Ausrichtung parallel zu den Begrenzungsflächen (vgl. *Bonzel u. Schmidt 1984a*, *Bonzel u. Schmidt 1984b*, *Bonzel u. Schmidt 1985*) bzw. zu einer eindimensionalen Faserausrichtung in Eckbereichen.

*Gröger u. a. 2011*, *Erdem 2002*, *Lin 1999* und *Soroushian u. Lee 1990* untersuchten in ihren Arbeiten die Abhängigkeit der Faserorientierung von der Bauteilhöhe und kommen jeweils zu dem Schluss, dass mit zunehmender Bauteilhöhe die Orientierung der Fasern in die Vorzugsrichtung abnimmt. Die zunächst zweidimensionale Ausrichtung der Fasern verschiebt sich zu einer dreidimensionalen Ausrichtung. *Rosenbusch 2004* fasst die Ergebnisse von *Soroushian u. Lee 1990* und *Lin 1999* in dem in Abbildung 2.13 dargestellten Diagramm zusammen.

Gemäß den Ansätzen von *Erdem 2002* und *Lin 1999* kann demnach bei einem Standardbiegebalken mit einer Höhe von 150 mm von einem Faserorientierungsbeiwert  $\eta_{\phi,150} = 0,6$  ausgegangen werden. Ergebnisse aus eigenen Untersuchungen können diese Einschätzung bestätigen.

Ein weiterer bei der Bauteilherstellung ausschlaggebender Faktor ist der Verdichtungsprozess. In einem durch Rütteln verdichteten Beton richten sich die Fasern eher senkrecht zur Verdichtungsrichtung aus (vgl. *Gettu 2005*). Hierbei sind die zuvor erläuterten Schalungs- und Randeinflüsse zu berücksichtigen. Bei der Herstellung von Versuchs-

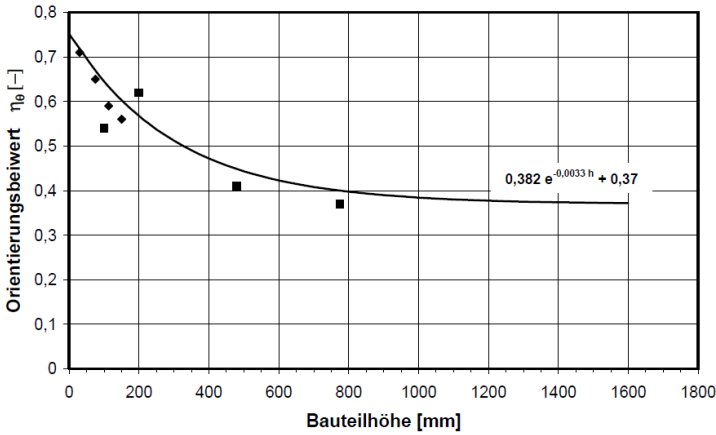


Abb. 2.13: Abhängigkeit der Faserorientierung von der Bauteilhöhe (vgl. *Rosenbusch 2004*)

körpern zur Ermittlung von Festbetoneigenschaften neigt der Frischbeton bei bestimmten Frequenzen zu einem Zirkulieren in der Schalung. Durch diesen kreisenden Betonfluss wird die Orientierung der Fasern erheblich beeinflusst. Die Verwendung eines Innenrüttlers führt zu einer inhomogenen Verteilung der Fasern in den Probekörpern, was zu einem schlechteren Tragverhalten bei der Bauteilprüfung führt (vgl. Untersuchungen in *Gettu 2005* und *Erdem 2002*).

### 2.1.5 Faserorientierungsbeiwert

Für die Beschreibung der Faserorientierung in einem Bauwerk hat sich der Faserorientierungsbeiwert  $\eta$  bewährt. Im Allgemeinen beschreibt er die mittlere Orientierung aller Stahlfasern innerhalb eines bestimmten Volumens. D. h. der Faserorientierungsbeiwert  $\eta$  beschreibt den Einfluss der Faserorientierung auf die Wirksamkeit der Fasern (Fähigkeit, Kräfte über den Riss zu übertragen).

Bisher wurde bei der experimentellen Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes die Orientierung der Faser an einer Schnittfläche oder Bruchfläche ermittelt. Allgemein gilt hier die Gleichung:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos \alpha_i \quad (2.2)$$

Mit:

- $\eta$  : Faserorientierungsbeiwert
- $N$  : Anzahl aller Fasern, die die betrachtete Fläche durchdringen
- $\alpha$  : Winkel, unter dem die Faser die betrachtete Fläche durchdringt

*Lin 1999* beschreibt beispielsweise den Faserorientierungsbeiwert  $\eta$  als Mittelwert des Verhältnisses der projizierten Einbindelänge  $l'_{fb}$  in Zugkraftrichtung zur wahren Einbindelänge  $l_b$  (vgl. Abbildung 2.14).

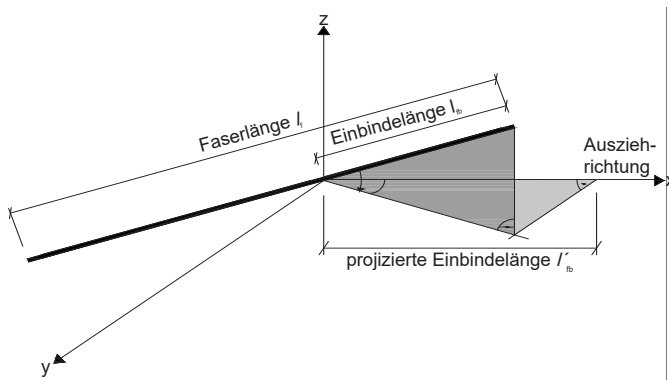


Abb. 2.14: Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes nach Lin 1999

Bei der optoanalytischen Bestimmung der Faserorientierung an Schnittflächen (vgl. Schönlin 1988, Tue u. a. 2007, Markovic 2006 sowie Ausführungen in Abschnitt 2.2.2) wird über die Auswertung der beim Schneiden entstehenden ellipsenförmigen Faserquerschnitte der Faserorientierungsbeiwert ermittelt (vgl. Abbildung 2.15).

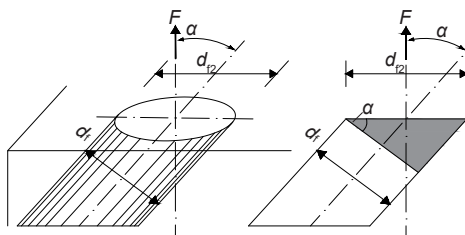


Abb. 2.15: Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes nach Markovic 2006

Pfyl 2003 betrachtet  $N$  Fasern, die parallel zueinander stehend eine bestimmte Fläche  $A_m$  einer Rissebene durchdringen. Für Fasern, die unter dem Winkel  $\Theta$  die Rissebene durchstoßen, gilt  $\eta = N \cdot \cos \Theta$  (vgl. Abbildung 2.16). Wiederum kann für verschiedene Winkel  $\Theta_i$  die Gleichung 2.2 angewandt werden.

Auf Grundlage der an Bruchflächen und Schnittflächen ermittelten Faserorientierungsbeiwerte ist jedoch nur bedingt eine Bewertung der Faserverteilung möglich. Für die Untersuchung eines Volumens müssten unzählige Schnittflächen hergestellt und analysiert werden.



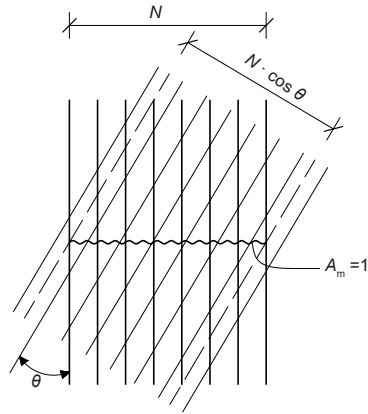


Abb. 2.16: Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes nach Pfyl 2003

Im Gegensatz hierzu wird bei der Analyse der dreidimensionalen Bilder der Computertomographie das gesamte Volumen betrachtet. Der hier bestimmte Faserorientierungsbeiwert  $\eta_\phi$  beschreibt das Verhältnis der projizierten Faserlänge  $L_{p,\phi}$  zur tatsächlichen Länge  $L_v$  innerhalb des betrachteten Volumens  $V$  und kann so nach Gleichung 2.3 berechnet werden.

$$\eta_\phi = \frac{L_{p,\phi}}{L_v \cdot V} \quad (2.3)$$

Mit:

$\eta_\phi$ :	Faserorientierungsbeiwert
$L_{p,\phi}$ :	projizierte Faserlänge
$L_v$ :	tatsächliche Faserlänge
$V$ :	betrachtetes Volumen

Der berechnete Faserorientierungsbeiwert liegt zwischen „0“ und „1“ und nimmt den größten Wert an, wenn alle Fasern parallel zur Richtung  $\phi$  ausgerichtet sind.

Im Folgenden werden die für eine Beeinflussung der Verteilung und der Ausrichtung von Fasern in Beton signifikanten Parameter aufgezeigt und es wird eine Übersicht aus Literatur zusammengestellter Faserorientierungsbeiwerte gegeben.

### Zusammenstellung von Faserorientierungsbeiwerten

Wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, verteilen und orientieren sich Stahlfasern in Abhängigkeit vieler unterschiedlicher Parameter, sei es in Folge von bestimmten Herstellungsmethoden des Stahlfaserbetons oder des Einflusses der verwendeten Faserart und der zugegebenen Fasermenge. Zur Vorhersage der aus diesen Parametern resultierenden Faserorientierungen wurden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen angestellt. Unterschieden werden hierbei eine eindimensionale (1D), zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Ausrichtung der Fasern.

In den Arbeiten von *Stamm 2001* sowie *Schönlin 1988* wurde jeweils eine Auswahl von Untersuchungsergebnissen aus der Literatur tabellarisch zusammengefasst. In den Tabellen 2.2 und 2.3 werden diese Angaben aufgenommen und erweitert. Die Literaturstellen, die in chronologischer Reihenfolge aufgelistet wurden, beinhalten sowohl analytisch ermittelte als auch aus Versuchen abgeleitete Faserorientierungsbeiwerte.

Aus dieser Zusammenstellung von Faserorientierungsbeiwerten (vgl. Tabelle 2.2 und 2.3) ergeben sich bezüglich einer eindimensionalen, zweidimensionalen und dreidimensionalen Ausrichtung folgende Bandbreiten (vgl. *Holschemacher u. a. 2011b*):

$$\text{3D-Ausrichtung: } 0,200 \leq \eta_{3D} \leq 0,667$$

$$\text{2D-Ausrichtung: } 0,375 \leq \eta_{2D} \leq 0,785$$

$$\text{1D-Ausrichtung: } 0,825 \leq \eta_{1D} \leq 1,000$$

Nach *Leutbecher 2007* beruhen die großen Unterschiede im Wesentlichen auf der Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen wie z. B. des Einflusses von zur Beanspruchungsrichtung parallelen Oberflächen und Kanten.

Tab. 2.2: Übersicht von Faserorientierungsbeiwerten aus der Literatur

Quelle	Faserorientierungsbeiwert $\eta$		Bemerkung
<i>Romualdi u. Mandel 1964</i>	3D	0,405	unter Annahme räumlich gleichmäßig verteilter Fasern
		0,637	für Fasern nahe der Betonoberfläche
<i>Abolitz u. Agbim 1964</i>	2D	0,500	auf die Belastungsrichtung projizierte Länge der Fasern nahe der Betonoberfläche
		0,500	für Fasern im Inneren des Bauteils
	3D	0,333	auf die Belastungsrichtung projizierte Länge der Fasern im Inneren des Bauteils
		0,375	
<i>Krenchel 1964</i>	2D	0,375	Betrachtung der Orientierung von Faserbündeln
	3D	0,20	
<i>Parimi u. Rao 1971 (nach Lin 1999)</i>	2D	0,637	
	3D	0,500	
	1D	0,825	Fasern im Bereich einer zur Belastungsrichtung parallelen Kante
<i>Kar u. Pal 1972</i>	2D	0,444	Fasern im Bereich einer zur Belastungsrichtung parallelen Oberfläche
	3D	0,333	gleichmäßig verteilte Fasern im Inneren des Bauteils

Tab. 2.3: Übersicht von Faserorientierungsbeiwerten aus der Literatur, Fortführung der Tabelle 2.2

Quelle	Faserorientierungsbeiwert $\eta$		Bemerkung
<i>Aveston u. Kelly 1973</i>	2D	0,637	Herangehensweise bei der Ableitung ähnlich <i>Parimi u. Rao 1971</i>
	3D	0,500	
<i>Schnütgen 1975</i>	1D	1,0	eindimensionale Ausrichtung im Kantenbereich
	2D	0,61 <sup>1)</sup>	in Abhängigkeit von E-Moduli, Querdehnzahl des Betons und dem Fasergehalt
	3D	0,506 <sup>1)</sup>	
<i>Stroeve 1978</i>	3D	0,525	Durchstrahlungsaufnahmen von dünnen Querschnitten aus einer schlanken Platte
<i>Schönlin 1988</i>	2D	0,785/ > 0,75 <sup>2)</sup>	Annahme, dass alle Faserendpunkte auf einem Kreis bzw. einer Kugel liegen
	3D	0,66/ > 0,45 <sup>2)</sup>	
<i>Soroushian u. Lee 1990</i>	1D	-	in Abhängigkeit von Probenhöhe und -breite, Faserlänge sowie Anzahl von Grenzflächen
	2D	-	
	3D	0,41	ungestörte dreidimensionale Ausrichtung, Beiwert nach <i>Romualdi u. Mandel 1964</i>
<i>Lin 1999</i>	1D	-	Expotenzialansätze für die Verwendung von glatten und mit Endaufbiegungen versehene Fasern in Abhängigkeit der Plattenhöhe
	2D	0,6 <sup>3)</sup>	
	3D	-	
<i>Erdem 2002</i>	2D	0,597 <sup>4)</sup>	Faseranzahl in Verbindung mit Ansätzen aus <i>Soroushian u. Lee 1990</i>
Markovic 2006	2D	0,867 <sup>5)</sup>	optoanalytische Auswertung von Standardbiegebalken, selbstverdichtender Beton mit 1 mm Größtkorn

<sup>1)</sup> Die angegebenen Werte beziehen sich auf in *Korb 2010* durchgeführte Untersuchungen

<sup>2)</sup> Versuche an Spritzbeton, Faser l/d = 25/0,4 mm, Fasergehalt 0,9 – 1,84 Vol.-%, (vgl. *Hilsdorf u.a. 1985*)

<sup>3)</sup> für Fasern mit Endaufbiegung bei einer Plattenhöhe von 150 mm, entspricht einem Standardbiegebalken

<sup>4)</sup> bei einer Plattenhöhe von 150 mm, entspricht einem Standardbiegebalken

<sup>5)</sup> für Fasern mit Endaufbiegungen, weitere Ergebnisse für glatte Fasern mit unterschiedlichem l/d-Verhältnis s. *Markovic 2006*

## 2.2 Verfahren zur Ermittlung von Faserorientierung und Fasermenge

### 2.2.1 Einleitung

Zur Bestimmung der Orientierung und der Menge von Stahlfasern in Beton stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. In *Wichmann u. a. 2013* wird eine Übersicht der wichtigsten weitgehend zerstörungsfreien Messverfahren gegeben. Die Autoren erläutern die einzelnen Methoden und stellen die Verfahren sowie deren Vor- und Nachteile tabellarisch gegenüber.

In den folgenden Erläuterungen bleiben die Methoden der Impedanzspektroskopie und des Mikrowellenverfahrens bzw. Permittivitätsverfahrens aufgrund der nicht vorhandenen Praxisrelevanz außen vor. Bei beiden Messverfahren handelt es sich um reine Forschungsarbeiten ohne Praxisanwendung.

Angesichts der ausführlichen Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten CT-Aufnahmetechnik in Kapitel 3 beschränkt sich die Beschreibung der Computer-Tomografie im Folgenden auf eine allgemein gültige Schilderung der Funktionsweise eines technischen Tomografen.

In Tabelle 2.4 werden auszugsweise die drei praxisrelevanten Verfahren, optoanalytische Betrachtung von Schnittflächen, Induktionsverfahren und Computer-Tomografie zusammenfassend dargestellt.

Das Induktionsverfahren wurde zu vergleichenden Untersuchungen mit dem im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Computer-Tomografie-Verfahren eingesetzt (vgl. *Schuler u. Sych 2009*).

### 2.2.2 Optoanalytisches Verfahren

Zur Beurteilung der Faserorientierung mittels optoanalytischem Verfahren werden zunächst aus Probekörpern Schnittflächen hergestellt. Beim Schneiden der Fasern entstehen je nach Ausrichtung runde oder elliptische Querschnitte, über deren Durchmesser und Achsausrichtung auf die Faserorientierung der einzelnen Faser geschlossen werden kann. Durch den Schneidevorgang „fransen“ die Faserränder aus. D. h. für eine automatische, auf Fotoaufnahmen basierende Analyse (vgl. *Tue u. a. 2007*) müssen die Schnittflächen aufwändig durch Schleifen und Polieren nachbearbeitet werden.

Das Auswerteprogramm bildet in einem ersten Schritt für erkannte Fasern Ersatzellipsen auf Basis der durch einen Algorithmus erkannten Faserpixel. Im zweiten Schritt werden die Ersatzellipsen in einem CAD-Programm mit dem Schnittbild überlagert (vgl. Abbildung 2.17). Dies bietet die Möglichkeit einer visuellen Kontrolle. Die Farbgebung der Ellipsen gibt dem Benutzer Aufschluss über bestimmte Eigenschaften der erkannten Fasern. Eine „grüne“ Markierung bedeutet, dass der kleine Ellipsendurchmesser dem angenommenen Durchmesser der Faser entspricht. Sich berührende Faseranschnitte werden „blau“ gekennzeichnet. Übersteigt der kleine Ellipsendurchmesser einen vorher gewählten Toleranzwert, geht die Software von einer Überbelichtung

Tab. 2.4: Übersicht der wichtigsten Messverfahren zur Bestimmung der Stahlfaserorientierung und -menge nach *Wichmann u. a. 2013*

Eigenschaften	Messverfahren		
	Optoanalytisches Verfahren	3D-Computer-Tomografie	Induktionsverfahren
Messprinzip	optisch	Röntgendurchstrahlung	elektromagnetische Induktion
Messung			
Stahlfasergehalt	++	++	+++
Faserorientierung	++	+++	+++
Kunststofffasern	+	++	-
Laborprobe	ja	ja	ja
Baustelle (Probe)	nein	nein	ja
am Bauwerk	nein	nein	nein
Frischbeton	nein	(ja)	ja
Festbeton	ja	ja	ja
Kombibewehrung	ja	ja	teilweise
Zuverlässigkeit/ Genauigkeit	++	+++	+++
Tiefenaussage	-	++/+++	++/+++
Messgerät			
Kosten	++	-	++
Messzeit	+++	-	+++
Mobilität	(+)	-	+++
Auswertedauer	-	-	+++
Gesamtaufwand	+	-	+++
Expertensystem	(nein)	ja	nein
Einfluss-, Fehlergrößen	Probenvorbereitung, Automatisierung	Probengröße	Fasertyp, magnetische Zuschläge
Legende: () mit Einschränkung, - schlecht (nicht möglich), + mäßig (unter bestimmten Voraussetzungen möglich), ++ gut, +++ sehr gut/ausgezeichnet			

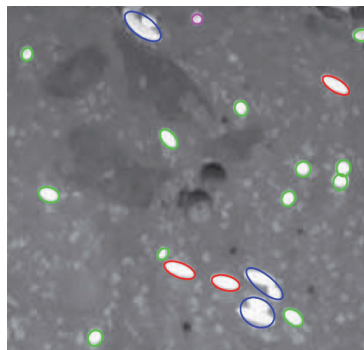


Abb. 2.17: Darstellung der Ersatzzellipsen in der Schnittflächenaufnahme (vgl. *Tue u. a. 2007*)

des Faseranschnittes aus und markiert diesen Bereich „rot“. Wird jedoch ein unterer Toleranzwert unterschritten, wird das Objekt mit der Farbe „magenta“ gekennzeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um ein Faserfragment handelt.

Im dritten und letzten Schritt erfolgt neben der Berechnung des Fasergehaltes bzw. der Faseranzahl die Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes nach *Markovic 2006* und *Hilsdorf u. a. 1985* (vgl. Abschnitt 2.1.4).

Hinsichtlich der Repräsentativität der Ergebnisse muss darauf hingewiesen werden, dass die zuvor beschriebenen Parameter lediglich an einer Schnittfläche bestimmt werden. Für eine zuverlässige Aussage über die Orientierung und Verteilung der Fasern müssen je Probe mehrere Schnitte untersucht werden bzw. sollten die ermittelten Fasergehalte und die Faserorientierung mit dem Mittelwert der Grundgesamtheit (Bauteil oder Probekörper) übereinstimmen (vgl. *Wichmann u. a. 2013*). D. h. bei der Bewertung der Ergebnisse müssen z. B. Schalungseffekte, die die Orientierung der Fasern bereichsweise beeinflussen, berücksichtigt werden.

Verfahrensbedingt können Fasern, die parallel zur Schnittfläche liegen nicht detektiert werden. In *Freytag 2014* wird eine Auswertung von drei orthogonal zueinander stehenden Schnittflächen vorgeschlagen. Auf diese Weise werden die nicht berücksichtigten Fasern in einem Schnitt mit einer anderen räumlichen Ausrichtung bei der Auswertung miteinbezogen.

### 2.2.3 Induktives Verfahren

Das nach der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ *DAfStb 2012* für die Ermittlung der Fasermenge zugelassene induktive Verfahren nutzt die ferro-magnetischen Eigenschaften der Stahlfasern. Bei dem auf dem Transformatorprinzip beruhenden Verfahren übernimmt die Betonprobe (Stahlfasern bzw. magnetische Bestandteile) die Funktion des Spulenkerns. Dieser wird von zwei Spulen umschlossen; eine Erregerspule, die durch einen Generator ( $G$ ) einen sinusförmigen Wechselstrom einspeist, und eine Induktionsspule, an der die induzierte Spannung ( $U_i$ ) gemessen wird (vgl. Abbildung 2.18). Hierbei liefert eine senkrecht zur Spule stehende Faser den größten Wert.

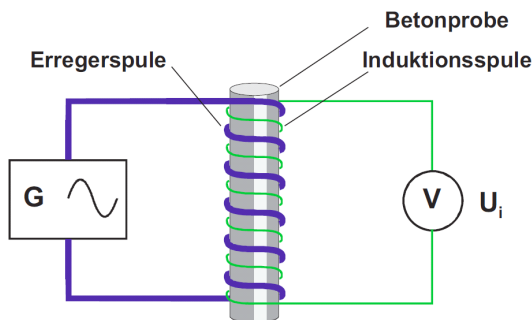


Abb. 2.18: Funktionsprinzip der induktiven Messung (vgl. *Hertz Messtechnik GmbH 2008*)

Aufgrund des Funktionsprinzips können metallische, magnetische oder elektronische Geräte oder Materialien die Messergebnisse beeinflussen. Der Abstand zu solchen Geräten oder Materialien sollte mindestens 60 cm betragen. Vorzugsweise sollten die Messungen auf einem Holz- oder Kunststofftisch durchgeführt werden.

Zur Berücksichtigung der temperaturabhängigen magnetischen Eigenschaften der Stahlfasern, kann eine Temperaturmessung der Probe mittels angeschlossenen Thermometer durchgeführt und in die Berechnung mit einbezogen werden. Eine Abweichung zwischen Kalibrier- und Messtemperatur kann so kompensiert werden.

Nach Angaben des Geräteherstellers (vgl. *Hertz Messtechnik GmbH 2008*) sollten für die Ermittlung der Faserorientierung die Fasern möglichst homogen verteilt sein. Die Bestimmung einer Faserverteilung ist aufgrund des Messprinzips nicht möglich. Für eine Messung über alle drei Raumrichtungen muss nach erfolgter Leermessung zum Abgleich mit der Umgebung der Probewürfel nach dem in Abbildung 2.19 dargestellten Schema gewendet werden.

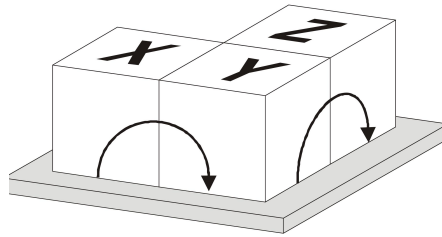


Abb. 2.19: Schematische Darstellung des Wendebrettes (vgl. *Hertz Messtechnik GmbH 2008*)

Die für die jeweilige Raumrichtung gemessene induzierte Spannung wird gemittelt und mit dem Gesamtvolumen der Probe ins Verhältnis gesetzt. Mithilfe der in der Datenbank hinterlegten oder selbst ermittelten Kalibrierwerte, kann der Fasergehalt innerhalb des Probenvolumens ermittelt werden. Die Orientierung der Fasern kann aus den Einzelmessungen bestimmt werden und wird als Verhältnis der induzierten Spannung ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ ) in Prozent angegeben. Zur Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes  $\eta$  kann mit Gleichung 2.4 eine Umrechnung in die bevorzugte Faserrichtung vorgenommen werden (hier am Beispiel der x-Richtung).

$$\eta_x = \frac{U_x}{\sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}} \quad (2.4)$$

Weiterführende Informationen über das Messsystem können *Wichmann u. a. 1999* und *Breitenbücher u. Rahm 2009* entnommen werden.

### 2.2.4 Computer-Tomografie

Grundlage für die Anwendung der Computer-Tomografie bildete die Entwicklung des mathematischen Verfahrens der Radontransformation, die vom gleichnamigen Österreicher *Johann Radon* 1917 als rein mathematischer Erkenntnisgewinn ohne die Mög-

lichkeit einer praktischen Anwendung entwickelt wurde. Dieses mathematische Verfahren ermöglicht es heute, zerstörungsfreie räumliche Aufnahmen eines Objektes mit seinen gesamten Innenstrukturen darzustellen. Die Computer-Tomografie (CT) entwickelte sich seit ihrer Einführung in den 1970er Jahren zu einem leistungsfähigen Werkzeug der medizinischen Diagnostik. Seit jüngster Zeit beschränkt sich der Einsatz nicht mehr ausschließlich auf den medizinischen Bereich.

Mithilfe der Computer-Tomografie können zerstörungsfrei alle Arten von Fehlstellen (Poren, Lunker, Einschlüsse, etc.) in einem betrachteten Volumen detektiert und als virtuelle, dreidimensionale Körper dargestellt werden. Hierbei können Größe und Lage solcher Fehlstellen genau vermessen werden. Besonderes Interesse gilt der Möglichkeit, Betonstrukturen und verschiedene Fasergehalte in faserverstärkten Betonen hinsichtlich des Materials und deren räumlicher Geometrie charakterisieren zu können.

Zur Erstellung der Durchstrahlungsaufnahmen befindet sich der Probekörper auf einem Drehteller zwischen Strahlungsquelle und Detektor (vgl. Abbildung 2.20). Für eine festgelegte Anzahl von Winkelpositionen (vgl. Kapitel 3) werden einzelne Durchstrahlungsaufnahmen erstellt. Mithilfe der „Tomographischen Rekonstruktion“ können aus diesen einzelnen Projektionen dreidimensionale Objekte rekonstruiert werden. Wie aus dem medizinischen Bereich bekannt, ist es nun möglich, aus diesen dreidimensionalen Bildern Schnittbilder zu generieren. Dies erlaubt eine detaillierte Betrachtung bestimmter Bereiche.

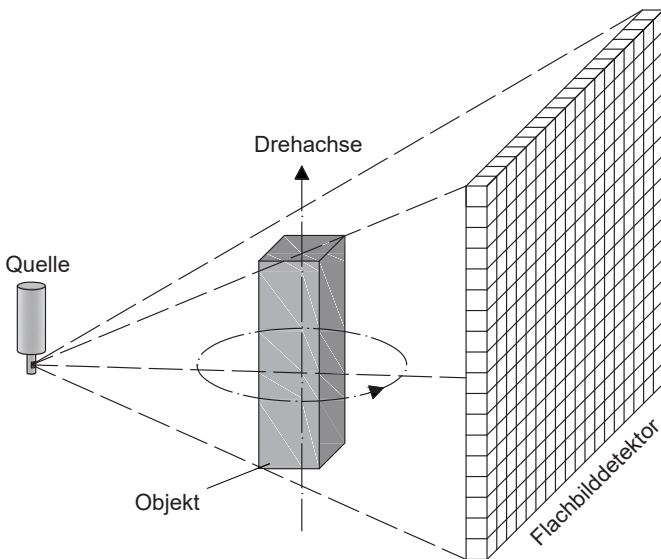


Abb. 2.20: Systematische Darstellung eines Standard-CT-Systems



## 3 Verwendete CT-Aufnahmetechnik

### 3.1 Einleitung

Im Folgenden wird die am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) verwendete Aufnahmetechnik hinsichtlich der vorhandenen Hardware sowie der vorgenommenen Einstellungen erläutert. Des Weiteren wird auf die Weiterentwicklung der Aufnahmeparameter zur Optimierung der Aufnahmezeit und -qualität bei Serien- und Einzelaufnahmen eingegangen.

### 3.2 Strahlungsquelle

Die im Jahr 1895 von W. C. Röntgen entdeckte Photonenstrahlung in Röntgenröhren zählt wie die Gammastrahlung aus Atomkernen zum Spektrum der elektromagnetischen Wellenstrahlungen. Die Röntgenröhre gehört zur Kategorie der Gleichspannungsbeschleuniger. Ein Heizfaden (Filament), das sich in einem Hochvakuum befindet, wird über eine Hochspannungsleitung gespeist. Über die Erhitzung des Filaments werden Elektronen emittiert. Der so entstandene Elektronenstrahl wird zunächst mittels einer Lochmaske am Filament gebündelt und danach durch eine Reihe von Ablenkeinheiten (stromdurchflossene Spulen) geleitet. Je nach gewähltem Aufnahmemodus werden Spulenpakete zur Bündelung des Elektronenstrahls vorgeschaltet. Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf dem Target, wird über das Abbremsverhalten der Elektronen (Wechselwirkung mit den Targetatomen) eine Röntgenstrahlung erzeugt. Bei der verwendeten Gerätekonfiguration kam ein Diamanttarget mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 25 W zum Einsatz.

Die Schnittfläche des Elektronenstrahls mit dem Target wird als Brennfleck bezeichnet. Die Brennfleckgröße bestimmt sich grundsätzlich in Abhängigkeit von der vom Target je Fläche aufnehmbaren Energie aus dem Elektronenstrahl, die als Wärmeenergie wieder abgegeben werden kann. D. h. mit zunehmender Spannung (mV) oder Leistung (W) vergrößert sich der Brennfleck. Hierdurch ergeben sich für die unterschiedlichen Aufnahmemodi unterschiedliche Brennfleckgrößen.

Die verwendete Mikrofokusröhre FXE-225.51 FOX (225 kV, 13,5 W) der Fa. Comet (Feinfocus) verfügt über vier unterschiedliche Aufnahmemodi:

- Nanofokus-Modus

Aufgrund einer niedrigen Targetleistung von unter 1 W entspricht die Brennfleckgröße maximal 1  $\mu\text{m}$ . So kann eine Auflösung im Bereich von 0,5  $\mu\text{m}$  bis 1  $\mu\text{m}$  erreicht werden.

- **Mikrofokus-Modus**

Mit einer Targetleistung von bis zu 10 W entsteht ein Brennfleck mit einer maximalen Größe von 2  $\mu\text{m}$ . Der Mikrofokus-Modus eignet sich für Auflösungen von 1  $\mu\text{m}$  bis 25  $\mu\text{m}$ .

- **High Power Modus**

Mit einer maximalen Targetleistung von 13,5 W und einem Brennfleck von bis zu 4  $\mu\text{m}$  eignet sich dieser Modus für Auflösungen im Bereich von 20  $\mu\text{m}$  bis 70  $\mu\text{m}$ .

- **Test Modus**

Im Test-Modus kann die Targetleistung unter der Verwendung eines Zusatzlüfters zu Kühlung des Targets auf 25 W erhöht werden und eignet sich so für Auflösungen von bis 100  $\mu\text{m}$ .

## 3.3 Flächendetektor

Grundsätzlich ist die Funktion des Flächendetektors mit der eines Fotosensors vergleichbar. Das auf den Sensor fallende Licht wird in elektrische Ladungen umgewandelt und so digitalisiert. Im vorliegenden Fall wird die Röntgenstrahlung mittels eines Szintillators in sichtbares Licht umgewandelt und sodann über darunter liegende Fotodioden in Elektronen umgewandelt.

Die maximal bestrahlbare Fläche des verwendeten Detektors der Fa. Perkin Elmer beträgt 406,6 mm<sup>2</sup> x 406,6 mm<sup>2</sup>. Auf dieser Fläche sind 2.000 x 2.000 aktive Pixel mit einer Größe von je 200  $\mu\text{m}$  angeordnet.

## 3.4 Manipulatoreinheit

Die zu durchstrahlende Probe befindet sich auf einem Drehteller, der durch eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuert entlang der Mittelstrahlachse und orthogonal dazu verschoben werden kann. Idealerweise befindet sich die Drehachse senkrecht zum Mittelstrahl, der den Detektor ebenfalls im Winkel von 90 Grad trifft.

Die Ausrichtung zwischen Detektor und Röntgenröhre wird über Voreinstellungen festgelegt, die sich aus regelmäßig durchgeführten geometrischen Messungen ergeben und in der Steuerungssoftware als „Kalibrierung“ hinterlegt sind. Zur vertikalen Ausrichtung wird nicht die Probe bewegt, sondern der Detektor und die Röntgenröhre werden synchron verfahren. In Abbildung 3.1 werden die zur Verfügung stehenden Bewegungsachsen der Manipulationseinheit zusammenfassend dargestellt.

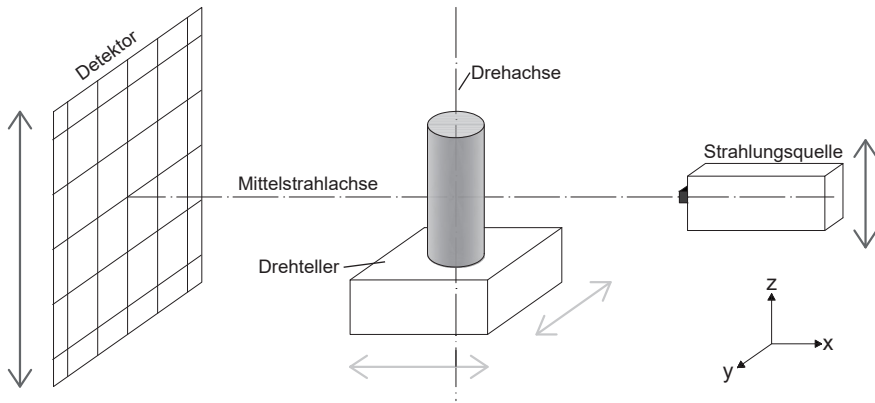


Abb. 3.1: Für die Ausrichtung der Probe zur Verfügung stehende Verfahrachsen der Manipulationseinheit

### 3.5 Durchführung von Aufnahmen und dabei verwendete Parameter

Durch Alterung der einzelnen „Detektorpixel“ entstehen unterschiedliche Empfindlichkeiten. Vor der eigentlichen CT-Aufnahme des Probekörpers sollte daher ein „Hellbild“ (Aufnahme ohne Probekörper) zur Kompensation unterschiedlicher Helligkeitswerte über die gesamte Detektorfläche erstellt werden. Zudem sollte zum Ausgleich defekter Pixel regelmäßig eine sogenannte „Bad Pixel Map“ erstellt werden. Hierbei werden defekte Pixel (hell oder dunkel) ausgeschaltet und der nicht mehr vorhandene Wert wird über die umliegenden Pixel gemittelt.

Beim Einbau des Probekörpers muss zunächst der Aufnahmebereich über das Verschieben der Probe auf der Strahlachse an die Detektorfläche angepasst werden. Über das Verhältnis der Abstände Detektor - Strahlungsquelle ( $FDA$ ) und Röntgenquelle - Prüfkörper ( $FOA$ ) kann die geometrische Vergrößerung bestimmt werden. D.h. der Prüfkörper wird auf der Strahlachse für die gewünschte Vergrößerung verschoben. Die maximal mögliche geometrische Vergrößerung ( $V$ ) und die damit verbundene Auflösung ist von der durch die Brennfleckgröße ( $D_f$ ) beeinflussten Unschärfe ( $U_f$ ) abhängig. Abbildung 3.2 verdeutlicht diese Zusammenhänge.

Die minimale effektive Pixelgröße sollte die Hälfte der Brennfleckgröße nicht unterschreiten.

Im nächsten Schritt wird der Drehmittelpunkt bestimmt. Anstelle des Probekörpers wird ein dünnes zylindrisches Objekt (Nadel, Nagel, etc.) auf Höhe der Mittelstrahlachse platziert. Durch Drehen wird die horizontale Position der vertikalen Drehachse bezüglich möglicher Abweichungen von der Mittelstrahlachse ermittelt und ein Korrekturwert an die horizontale Achse des verfahrbaren Drehtellers weitergegeben. Dieser Wert entspricht der später bei der Rekonstruktion zu erreichenden Pixelgröße.

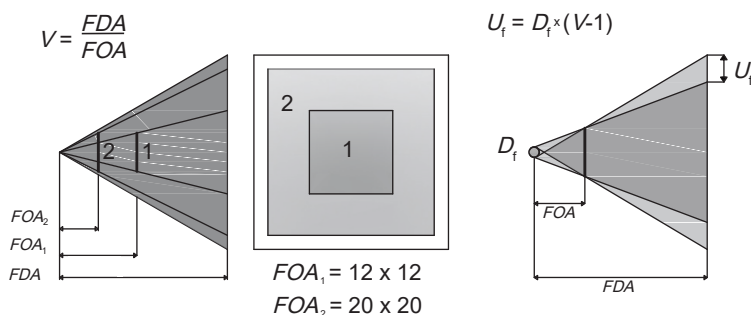


Abb. 3.2: Systematische Darstellung der geometrischen Vergrößerung (durch Verschieben des Probekörpers auf der Strahlachse) und der durch die Brennfleckunschärfe bedingten Auflösungsgrenze nach *Spinnler u. a. 2010*

Über eine Mittelung von mehreren Durchstrahlungsaufnahmen eines Winkelschrittes kann das Rauschen reduziert werden. Die Anzahl der zu verwendenden Mittelungen ist abhängig vom Energielevel (kV). Die Feinjustierung über Mittelung mehrerer Aufnahmen ist im unteren Leistungsbereich der Röhre nötig, da hier das Grundrauschen des Detektors höher ist. Bei einem höheren Energieauftrag auf die einzelnen Zellen des Detektors ergibt sich ein geringeres Grundrauschen. Somit ist bei einer höheren angelegten Spannung eine Reduzierung der Mittelungen möglich.

Analog zur Fotografie kann die Belichtungsdauer variiert werden. Die einstellbaren Belichtungszeiten sind detektorabhängig und liegen bei dem hier verwendeten Detektor bei 499 ms bzw. 999 ms (1 s).

Die Anzahl von Winkelschritten ist in erster Linie von der verwendeten Auflösung abhängig. Grundsätzlich ist eine hohe Anzahl von rund 1600 Winkelschritten oder mehr bei hohen Auflösungen (Pixelgröße ca. 2-5  $\mu\text{m}$ ) sinnvoll, um die Bildqualität hinsichtlich der „Schärfe“ im Detailbereich zu verbessern. Somit stehen für die Rekonstruktion mehr Bildinformationen zur Verfügung. Bei größeren Auflösungen im Bereich von 50  $\mu\text{m}$ /Pixel kann die Anzahl der Winkelschritte reduziert werden, da die Detailbereiche für die Rekonstruktion in ausreichender Bildqualität vorliegen.

Im höheren Spannungsbereich kann über die Erzeugung einer Strahlaufhärtung der niederenergetische Bereich der Strahlung absorbiert werden. Für das Ausfiltern materialspezifischer Spektren können beispielsweise Kupfer-, Messing- oder Aluminiumplättchen in den Strahlengang eingebracht werden. Für eine bessere Darstellung der Stahlfasern bietet sich der Einsatz eines Aluminiumfilters an.

Zu einer Strahlaufhärtung kommt es ebenfalls innerhalb des Probekörpers. Die im vorderen Bereich des Durchstrahlungsweges liegenden Stahlfasern absorbieren einen Teil des für Stahl typischen niederenergetischen Bereichs der Strahlung, sodass dieser für die dahinter liegenden Stahlfasern bei der Durchstrahlung nicht mehr zu Verfügung steht. Dies kann zu Artefakten bei der Rekonstruktion führen. Über den Einsatz einer speziellen Software kann die Artefaktbildung reduziert werden.

Während der Aufnahme kann es zu einem „Brennfleckdrift“ kommen. Die Erwärmung der Röntgenröhre und des Targets bewirkt ein Wandern des Brennflecks. Diesem Effekt wird über ein Vorheizen des Systems sowie einer Nachbehandlung der Einzelbilder über einen ermittelten Korrekturfaktor entgegengewirkt.

Nach erfolgreich durchgeführter Aufnahme und Rekonstruktion steht ein dreidimensionaler Datensatz zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung.

## 3.6 Optimierung der Aufnahmeparameter

Die benötigten Aufnahmeparameter, wie z. B. die verwendete Leistung der Röhre oder die Anzahl der Winkelschritte und Bildmittelungen, hängen u. a. von der Probengeometrie sowie den Materialien, aus denen der aufzunehmende Körper besteht, ab. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen hinsichtlich der Aufnahmeparameter sowohl an einzelnen Probekörpern als auch an großen Serien durchgeführt.

### Einzelaufnahmen

Bei einzelnen „aufwändigen“ Probekörpern bestand die Herausforderung darin, trotz komplizierter Probengeometrien (unterschiedliche zu durchstrahlende Materialstärken) und hohen Fasergehalten Aufnahmen mit bestmöglicher Bildqualität zu erstellen. Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft die Visualisierung eines Formteils aus hochbewehrtem Ultrahochfesten Beton (Druck-Schublager, vgl. *Schuler u. Schladitz 2011*).

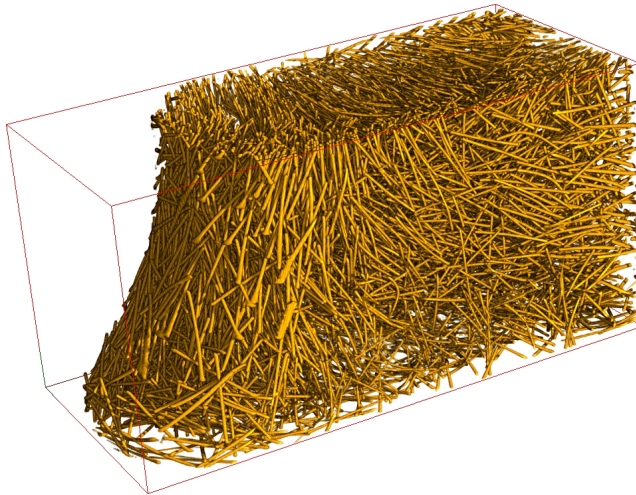


Abb. 3.3: Visualisierung eines Druck-Schublagers, Bildausschnitt (vgl. *Schuler u. Schladitz 2011*)

Material:	Ultrahochfester Beton UHPC mit Mikrofaser
Faserart:	Mikrostahldrahtfaser, $l = 8-10 \text{ mm}$ , $d = 0,2 \text{ mm}$
Fasergehalt:	2-5 Vol.-%

Unter Anwendung der folgenden Aufnahmeparameter konnten mit der vorhandenen CT-Anlage die beste Bildqualität für eine Analyse erzielt werden.

#### *Schub-Drucklager (UHPC mit Mikrofasern)*

Winkelschritte:	1600 Winkelschritte
Mittelungen:	Mittelung aus 3 Aufnahmen je Winkelschritt
Belichtungszeit:	1 Sekunde je Durchstrahlungsaufnahme
Spannung:	konstant 200 kV
Leistung:	17,8 W
Leistungsaufnahme am Target:	90,4 $\mu$ A
Resultierende Aufnahmezeit:	80 Minuten

#### **Serienaufnahmen zylindrischer Proben**

Besteht die Aufgabe darin, große Serien mit Proben gleicher Geometrie, Abmessung und Zusammensetzung aufzunehmen und zu analysieren, so steht die Reduzierung der Aufnahmezeit bei ausreichender Bildqualität, die eine Analyse erlaubt, im Vordergrund. Ziel ist hier neben dem reinen Zeitgewinn auch ein verschleißärmerer Betrieb der CT-Anlage.

Bei Probekörpern mit zylindrischer Grundform (gleichbleibende zu durchstrahlende Materialstärke) und einem geringen Durchmesser sind Aufnahmen mit relativ gleichmäßigen Grauwertverläufen möglich. Bei Stahlfaserbetonen kommt begünstigend für eine gute Bildqualität die gegenüber den bei faserverstärkten Ultrahochfesten Betonen (UHPC) üblichen hohen Fasergehalten (siehe zuvor) geringere Fasermenge hinzu. Aufgrund der hohen Dichte des Stahls kommt es bei hohen Fasergehalten zu Strahlabschwächungen und -aufhärtungen in der Probekörpermitte.

Hinsichtlich der hohen Probekörperanzahl und der damit verbundenen Belegungszeit des Computertomographen wurden die Aufnahmeparameter für eine möglichst kurze Aufnahmezeit angepasst.

Im Rahmen von Untersuchungen zum Faktor zur Berücksichtigung der Faserorientierung  $\kappa_F^f$  nach der Richtlinie für Stahlbeton des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (*DAfStb 2012*) am Beispiel von Tunneltübbings (vgl. *Schuler u. a. 2017*) konnten unterschiedliche Aufnahmeparameter getestet werden.

Die insgesamt 27 Probekörper (Bohrkerne  $d = 50$  mm) wurden in drei Prüfserien eingeteilt und für jede dieser Serien die Einstellungen variiert.

#### *Serie I*

Winkelschritte:	1.600 Winkelschritte
Mittelungen:	Mittelung aus 3 Aufnahmen je Winkelschritt
Belichtungszeit:	1 Sekunde je Durchstrahlungsaufnahme
Spannung:	konstant 200 kV
Leistung:	17,8 W
Leistungsaufnahme am Target:	90,4 $\mu$ A
Resultierende Aufnahmezeit:	80 Minuten

*Serie II*

Winkelschritte:	800 Winkelschritte
Mittelungen:	Mittelung aus 2 Aufnahmen je Winkelschritt
Belichtungszeit:	1 Sekunde je Durchstrahlungsaufnahme
Spannung:	konstant 210 kV
Leistung:	17,4 W
Leistungsaufnahme am Target:	84 $\mu$ A
Resultierende Aufnahmezeit:	27 Minuten

*Serie III*

Winkelschritte:	1.200 Winkelschritte
Mittelungen:	keine Mittelung
Belichtungszeit:	1 Sekunde je Durchstrahlungsaufnahme
Spannung:	konstant 200 kV
Leistung:	18 W
Leistungsaufnahme am Target:	91 $\mu$ A
Resultierende Aufnahmezeit:	20 Minuten

Über die schrittweise Anpassung der Aufnahmeparameter konnte die reine Aufnahmezeit deutlich reduziert werden. Die gleichbleibende gute Qualität aller Aufnahmen erlaubte eine saubere Binarisierung ohne Über- oder Unterbewertung der Fasern.

Aufgrund der guten Bildqualität konnte, gegenüber der in Abschnitt 4.4 erläuterten Vorgehensweise zur Auffindung des idealen Schwellwertes zur Segmentierung des Fasersystems (über den Abgleich mit dem bekannten Faserdurchmesser) der Schwellwert über die Betrachtung des Histogramms der Grauwertverteilung und dem visuellen Abgleich mit den Schnittbildern erfolgen.

Für alle Aufnahmen konnte eine Auflösung von 69  $\mu$ m/Pixel erreicht werden.

**Serienaufnahmen prismatischer Probekörper**

Im Rahmen der Arbeiten zur Untersuchung von rissquerenden Fasern wurden in großer Stückzahl prismatische Probekörper aufgenommen und analysiert.

In einer ersten Versuchsserie wurden Proben mit unterschiedlichen Diagonalen (resultierend aus dem Rissverlauf im 4-Punkt-Biegeversuch) verwendet. Entgegen der zuvor beschriebenen Proben mit relativ kleinen maximalen Materialstärken benötigt man bei der Aufnahme von prismatischen Probekörpern mit Diagonalen bis zu 110 mm eine höhere Strahlungsenergie.

Die verwendete Röntgenröhre verfügt über einen Testmodus, in dem die Leistungseinstellungen außerhalb des „normal“ verfügbaren Bereichs einstellbar sind. Für die Aufnahmen wurde die Röhrenleistung auf ca. 25 W erhöht, was einer Leistungsaufnahme am Target von über 124  $\mu$ A entspricht. Mit der hohen Leistung geht eine hohe Temperaturentwicklung einher, die die Lebenszeit des Filaments deutlich verkürzt. Die Temperaturabgabe am Target wurde mit zusätzlichen Lüftern unterstützt. Folgende Parameter wurden verwendet:

Winkelschritte:	1.200 Winkelschritte
Mittelungen:	Mittelung aus 3 Aufnahmen je Winkelschritt
Belichtungszeit:	1 Sekunde je Durchstrahlungsaufnahme
Spannung:	konstant 200 kV (Grenzbereich)
Leistung:	24,7 W
Leistungsaufnahme am Target:	124,4 $\mu$ A
Resultierende Aufnahmezeit:	60 Minuten
Erzielte Auflösung:	88 - 94 $\mu$ m/Pixel

Für die in Kapitel 6 vorgestellten Untersuchungen konnten aufgrund der Durchführung von 3-Punkt-Biegeversuchen mit Kerbe Probekörper mit gleichen Abmessungen gewonnen werden.

Die identischen Abmessungen der Teilproben erlaubten gleichbleibende Aufnahmeparameter für alle 36 Probekörper. In Abhängigkeit der während und/oder zwischen den einzelnen Aufnahmen veränderlichen Parametern, wie z. B. der Temperatur der Röhre, schwanken bei gleichbleibender angelegter Spannung sowohl die Leistung als auch die Leistungsaufnahme am Target.

Aufgrund des in vorhergehenden Arbeiten beobachteten Verschleißes (z. B. Filamente) war es zunächst Ziel, qualitativ gute Aufnahmen trotz geringerer Leistung der Röhre zu erstellen. Zudem sollte die Belegungszeit der CT-Anlage gegenüber den bisher durchgeführten Aufnahmen verkürzt werden.

Zur Reduzierung der Aufnahme- und Rekonstruktionszeit und deren Auswirkung auf die Bildqualität wurden mehrere Aufnahmen mit veränderten Aufnahmeparametern hergestellt und miteinander verglichen. Voraussetzung für die spätere Analyse war eine ausreichende Bildqualität.

Durch eine Reduzierung der Winkelschritte werden u. a. Detailbereiche unschärfer dargestellt. Dies wirkt sich jedoch bei der erzielten Voxelgröße von rund 78  $\mu$ m nur in geringem Maße aus. Werden die Mittelungen aus mehreren Aufnahmen eines Winkelschrittes reduziert, kann es zu einem stärkeren Rauschen kommen. Jedoch ergibt sich infolge des relativ hohen Energieauftrags auf den Detektor ein geringeres Grundrauschen, was bei den vorliegenden Aufnahmen eine Reduzierung der Mittelungen erlaubte.

Die schrittweise durchgeführte Anpassung der Aufnahmeparameter ergab folgende Einstellungen, die für die gesamte Aufnahmeserie angewendet werden konnten:

Winkelschritte:	800 Winkelschritte
Mittelungen:	Mittelung aus 2 Aufnahmen je Winkelschritt
Belichtungszeit:	1 Sekunde je Durchstrahlungsaufnahme
Spannung:	konstant 210 kV
Leistung:	16,8 W bis 17,4 W
Resultierende Aufnahmezeit:	27 Minuten
Leistungsaufnahme am Target:	79 $\mu$ A bis 84 $\mu$ A

Eine weitere Reduzierung der Belegungszeit der CT-Anlage konnte durch die erst nachträglich durchgeführte Rekonstruktion der Aufnahmen erzielt werden.



## **4 Be- und Verarbeitung der Bilddaten**

### **4.1 Einleitung**

Der Umgang mit Bildern unterschiedlicher aus der Aufnahme- und Probenart resultierender Qualitäten, die einer Analyse zugeführt werden sollen, machen eine Bearbeitung dieser Bilder zur Verbesserung der Qualität unumgänglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden eine Vielzahl von Filtern und/oder Operationen und deren Kombination auf die Anwendbarkeit überprüft. Zudem werden Hinweise zur Charakterisierung von Objekten und der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Segmentierung des Fasersystems gegeben.

Die Erläuterungen in den folgenden Abschnitten begrenzen sich auf die in dieser Arbeit verwendeten Filter und die wichtigsten im Zusammenhang stehenden Begrifflichkeiten.

### **4.2 Bildbearbeitungsfilter**

#### **4.2.1 Mean-Filter**

Bei einem Mean-Filter handelt es sich um einen Glättungsfilter, bei dem alle Grauwerte innerhalb der Maske (Filteroperator) summiert und im Anschluss durch die Anzahl der Operatorenpunkte dividiert werden. Infolge dessen werden die Grauwertübergänge angenähert und es entsteht ein scheinbar unschärferes Bild, in dem Kanten unterdrückt werden. In Abbildung 4.1 wird die Funktionsweise eines linearen Filters schematisch dargestellt.

#### **4.2.2 Median-Filter**

Der Median-Filter erlaubt die Entfernung einzelner Pixelstörungen ohne den korrekten Bildwert zu beeinflussen. Im Ergebnisbild entstehen gegenüber dem Mean-Filter keine neuen Grauwerte. Kanten und lineare Grauwertverläufe bleiben erhalten. Bei einem Rangordnungsfilter werden die Nachbapixel eines Bildpunktes in aufsteigender Folge geordnet. Ein neuer Grauwert wird anhand der Position in der Reihe (hier der Median) ermittelt. Dadurch werden Grauwerte, die in ihrer Umgebung „Ausreißer“ darstellen, durch geeignetere Werte ersetzt. Es entsteht ein Bild mit geringerer Detailtiefe.

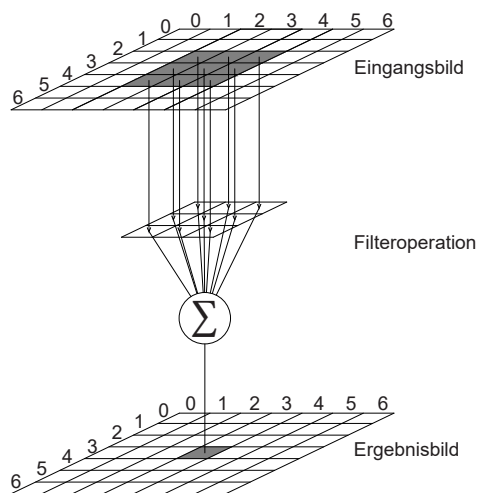


Abb. 4.1: Funktionsweise eines linearen Filters (vgl. Demant u. a. 1998)

### 4.2.3 Erosion und Dilatation

Grundsätzlich können die Operationen Erosion und Dilatation zur systematischen Ausdehnung und Schrumpfung von binären Bildobjekten angewendet werden.

Zur Filterung wird ein Strukturelement gewählt, das wie eine Art Maske über das Originalbild geschoben wird. In dem in Abbildung 4.2 dargestellten Beispiel wurde ein Strukturelement der Größe 3x3 gewählt. Der Mittelpunkt des Strukturelements dient hierbei als Referenz.

Im Fall der Erosion bleibt nur an den Stellen, an denen alle Punkte (Pixel) des Strukturelements mit einem Punkt des Originalbilds zusammenfallen, ein Punkt bestehen. Bei der Dilatation kommen Punkte hinzu, wenn mindestens ein Punkt des Strukturelements mit einem Punkt des Originalbilds zusammenfällt.

Mithilfe der Erosion können kleinere Störobjekte entfernt werden. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass alle Objekte kleiner werden. Über die Kombination von Erosion und Dilatation kann dieser Effekt teilweise ausgeglichen werden. Eine Erosion gefolgt von einer Dilatation wird Opening genannt. Über dieses „Öffnen“ können dünn verbundene Objekte getrennt und kleine Störobjekte sowie dünne Linien entfernt werden (vgl. Abbildung 4.3 und 4.2 (oben)).

Kleine Löcher in Objekten können mithilfe der Dilatation geschlossen werden. Hierbei werden alle Objekte vergrößert. Auch hier ermöglicht die Kombination der beiden Filter Erosion und Dilatation Abhilfe. Eine Dilatation gefolgt von einer Erosion nennt man Closing. Diese Operation ermöglicht das Schließen von kleinen Löchern und dünnen Rissen sowie das Verbinden naheliegender Objekte (vgl. Abbildung 4.4 und 4.2 (unten)).

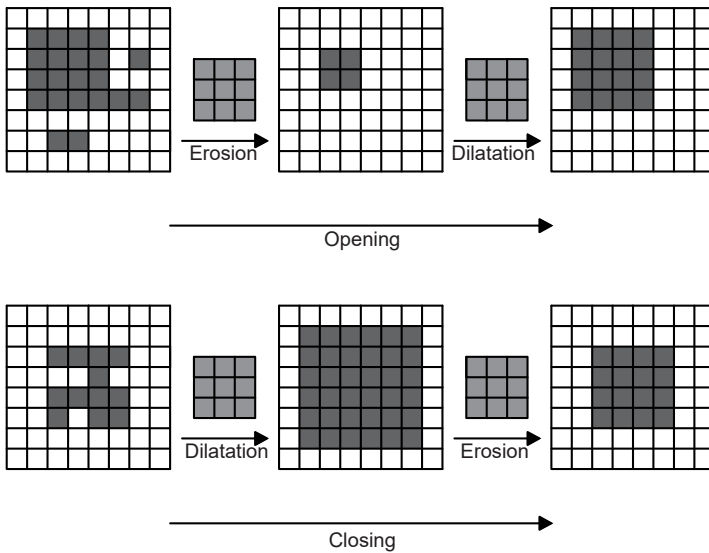


Abb. 4.2: Systemdarstellung der Zusammenhänge der morphologischen Operationen Erosion und Dilatation nach *Luhmann 2000*

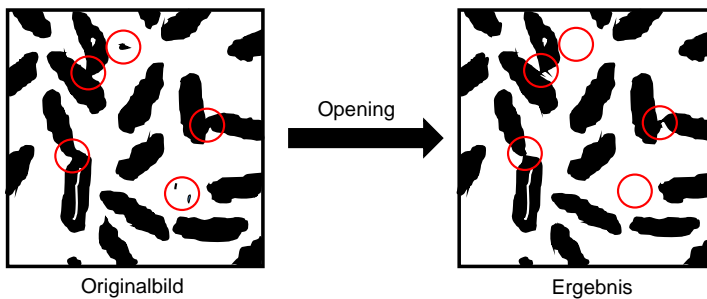


Abb. 4.3: Auswirkung des Opening-Filters (Trennen und Entfernen)

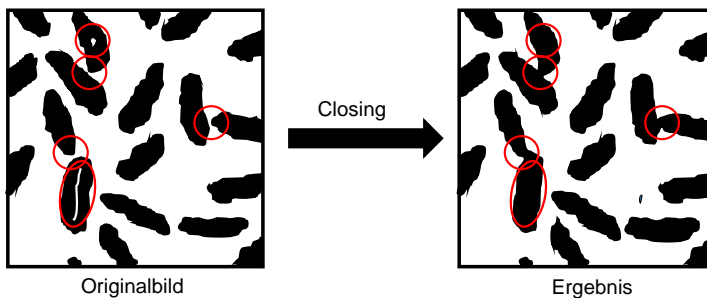


Abb. 4.4: Auswirkung der Closing-Filters (Schließen und Verbinden)

### 4.2.4 Fill Holes

Entgegen der Operation „Dilatation“, die beim Schließen von kleinen Löchern alle Objekte vergrößert, ist es mit dem Filter „fill holes“ möglich, kleinere Löcher ohne Veränderung größerer Objekte zu schließen bzw. zu verkleinern. Der Begriff Löcher (holes) bezieht sich auf lokale Minima eines Bildes, die keinen der Bildränder berühren. Diese Minima können an den in einer bestimmten Nachbarschaft höchstens vorhandenen Grauwert angepasst werden.

### 4.2.5 Objektfilter

Ein in der Software „MAVI“ integrierter Objektfilter erlaubt das Entfernen von Objekten anhand bestimmter Eigenschaften dieser Objekte. Grundlage bildet das sogenannte Labeling, das anhand von Pixelnachbarschaften eine Objekterkennung durchführt (weitere Informationen zum Labeling können Abschnitt 6.2.4 entnommen werden). Für diese detektierten Objekte können mittels der Software objektspezifische Parameter bestimmt werden (vgl. Abschnitt 4.3).

Drei charakteristische Merkmale stehen zur Filterung der Objekte zur Verfügung:

- „Volume“  
Mit einer direkten Eingabe oder über die Verwendung von Schiebereglern kann zwischen einem minimalen und maximalen Volumen ein Bereich für die nicht zu entfernenden Objekte gewählt werden.
- „Shape factors“  
Die „shape factors“ beschreiben die Form von Objekten im Verhältnis zu Kugeln oder Rechtecken (vgl. Abschnitt 4.3.3). Auf diese Weise können abweichende Formen herausgefiltert werden.
- „Border“  
Objekte, die den Bildrand berühren, können entfernt werden.

## 4.3 Charakterisierung von Objekten

### 4.3.1 Allgemeines

Die mit dem weiterentwickelten Programmmodul „MAVIparticle“ (vgl. *Schladitz u. Goehardt 2016*) zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Charakterisierung von Objekten auf Basis dreidimensionaler Bilder werden in *Vecchio u. a. 2010* vorgestellt. Die Entwicklung des Verfahrens bezieht sich auf eine Sauberkeitsanalyse beim Herstellungsprozess von Bauteilen, die bisher mittels zweidimensionaler Mikroskopaufnahmen durchgeführt wurde.

Ziel der Analyse ist die umfassende Beschreibung der räumlichen Gestalt von z. B. in Legierungen eingeschlossener Schmutzpartikel. Während beispielsweise ein faserartiges Objekt trotz eines großen Volumens in einen Spalt eindringt, bleibt ein gedrunge-

nes kornförmiges Objekt hängen. Wichtig ist also die Einschätzung, ob ein Objekt in eine Öffnung mit vorgegebenen Maßen eindringen kann.

Im Folgenden werden die in *Vecchio u. a. 2011* und *Vecchio u. a. 2010* verwendeten Parameter („particle features“) zur Charakterisierung von Objekten, die in dem Programmmodul „MAVparticle“ eingebunden wurden, vorgestellt. Grundsätzlich beschränkte sich die Anwendung dieser Parameter bisher ausschließlich auf die Detektion von ungewollten Einschlüssen (Schmutzpartikel) in verschiedenen Materialien. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die zur Verfügung stehenden analysierbaren Parameter und daraus abgeleitete weitere Vergleichsparameter zur Beschreibung von Stahlfasern verwendet (vgl. Kapitel 6).

### 4.3.2 Bounding Box

Die Fläche und die Form sind grundlegende geometrische Größen für die Beschreibung eines Objektes, die unter Zuhilfenahme bestimmter Algorithmen bereits an zweidimensionalen Bildern ermittelt werden können (vgl. *ASTM F1877-05 2010*). Für größere Objekte besteht die Möglichkeit diese z. B. mithilfe eines Messschiebers zu vermessen. Unter einer zweidimensionalen Betrachtung entspricht dann die Länge des Partikels dem Durchmesser eines Kreises, der die äußersten Punkte des Partikels berührt. Die Breite des Partikels entspricht dann dem größten Durchmesser orthogonal zur Länge.

Liegt eine dritte Dimension vor, kann zusätzlich neben der Dicke auch das Volumen der Partikel bestimmt werden. Form und Größe der Objekte reichen für eine klare Aussage bezüglich der räumlichen Orientierung nicht aus. Eine räumliche Eingrenzung durch einen das Objekt umschließenden Quader mit minimalem Volumen eröffnet die Möglichkeit, Informationen über die räumliche Ausrichtung des Objektes zu erlangen. Auf Basis des QuickHall-Algorithmus (vgl. *Berg u. a. 2008*) werden die Grenzen dieser Box erzeugt. Hierzu muss man sich das Objekt, das aus einzelnen Pixeln besteht, als Punktwolke vorstellen. Zunächst wird eine objektumschließende Hülle erzeugt, die auch die Krümmung des Objekts wiedergibt. Die Länge der ersten Seite eines das Objekt umschließenden Quaders, entspricht der Strecke zwischen den voneinander entferntesten Punkten in der konvexen Hülle. Nun werden alle Punkte auf eine Ebene senkrecht zu dieser Linie projiziert. Der in dieser Projektion gefundene maximale Durchmesser entspricht der zweiten Kantenlänge des Quaders. Damit ist auch die Richtung der dritten Kante gefunden. Die Länge der Kante entspricht dem Abstand der am weitesten voneinander entfernten Punkte in dieser Richtung. Diese „Bounding Box“ entspricht noch nicht dem Quader mit minimalem Volumen. Über die Einteilung des Quaders in viele einzelne kleine Quader und der Anwendung weiterer Algorithmen wird der objektumschließende Quader mit minimalem Volumen gefunden (vgl. *Barequet u. Har-Peled 2001*, *Berg u. a. 2008*, *Freeman u. Shapira 1975*, *Vecchio u. a. 2011*).

Die Kantenlängen des Quaders werden in absteigender Reihenfolge der Größe nach in Länge  $l$ , Breite  $w$  und Dicke  $t$  angegeben. Anhand der Verhältnisse von  $l/w$  und  $w/t$  lässt sich für die Großzahl von untersuchten Objekten eine erste Klassifizierung in

Körner (rund, kugelförmig), Chips (plattig) und Fasern (länglich) treffen.

$$\begin{aligned}
 l \sim w \sim t &\Rightarrow \text{Körner} \\
 l \sim w \neq t \text{ oder } l \neq w \neq t &\Rightarrow \text{Chips} \\
 l \neq w \sim t &\Rightarrow \text{Fasern}
 \end{aligned}$$

In Anlehnung an die sogenannten Zingg-Diagramme (vgl. *Zingg 1935*), die aus dem Bereich der Schotteranalyse stammen, kann für die Beschreibung „verschieden“ ( $\neq$ ) ein Verhältnis des kleineren zum größeren Wert von  $2/3$  angenommen werden. Sind

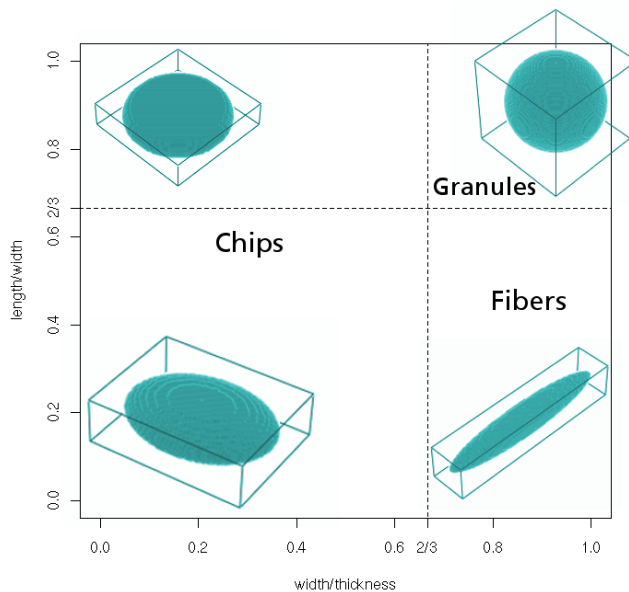


Abb. 4.5: Zingg-Diagramm mit dem Schwellwert  $2/3$  (vgl. *Vecchio u. a. 2011*)

die Objekte jedoch in sich verdreht oder stark gebogen (vgl. Abbildung 4.6) kommt es zu Fehlern in der Klassifizierung, und es müssen weitere Vergleichsparameter herangezogen werden.

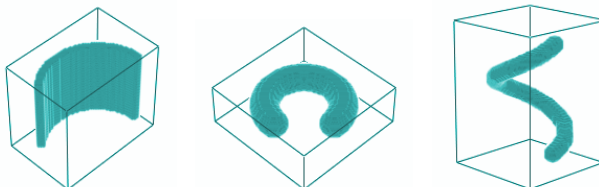


Abb. 4.6: Objektformen die zu Fehlern in der Klassifizierung führen (vgl. *Vecchio u. a. 2011*)

### 4.3.3 Shape Factors

Das Volumen  $V$ , die Oberfläche  $S$  und die mittlere Krümmung  $M$  bilden die Basis geometrischer Kennzahlen von Objekten in räumlichen Bildern (vgl. *Vecchio u. a. 2011*, *Ohser u. Mücklich 2000*). Auf Basis dieser Kennzahlen lassen sich weitere Parameter zur Charakterisierung von Objekten ermitteln.

Über das Volumen lässt sich die Größe eines Objektes zunächst am Einfachsten bestimmen. Im vorliegenden Fall bestimmt sich das Volumen des Partikels aus der Summe der zugehörigen Pixel. Zudem kann die Oberfläche des Partikels ermittelt werden (vgl. *Ohser u. Schladitz 2009*).

Gemäß *Stoyan u. a. 1995* kann über Formfaktoren „shape factors“, die auf den drei Parametern Volumen  $V$ , Oberfläche  $S$  und mittlere Krümmung  $M$  beruhen, eine Einteilung bezüglich ihrer Form durchgeführt werden.

$$f_1 = 6\sqrt{\pi} \frac{V}{\sqrt{S^3}} \quad (4.1)$$

$$f_2 = 48\pi^2 \frac{V}{M^3} \quad (4.2)$$

$$f_3 = 4\pi \frac{S}{M^2} \quad (4.3)$$

Als Referenz dienen geometrische Formen wie Kugeln oder Rechtecke. Der Formfaktor  $f_1$  beschreibt die Sphärizität eines Objektes und kann Werte zwischen „0“ und „1“ annehmen. Die Sphärizität gibt das Verhältnis der Oberfläche einer Kugel zum untersuchten Objekt mit gleichem Volumen an (vgl. *Wadell 1935*). Für Objekte, die einer Kugel gleichen, nehmen alle Formfaktoren den Wert „1“ an.

*Vecchio u. a. 2011* enthält eine tabellarische Übersicht über die Auswirkungen unterschiedlicher Objektformen auf die Formfaktoren  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$ . Für die untersuchten Beispiele konnte, basierend auf den Formfaktoren, folgende Zuordnung ermittelt werden:

$$f_3 \leq 0,5 \Rightarrow \text{ Fasern }$$

$$f_1 \leq 0,7 \Rightarrow \text{ Chips }$$

$$f_1 > 0,7 \Rightarrow \text{ Körner }$$

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den untersuchten Datensätzen um simulierte Objekte handelt und diese sich von „echten“ Objekten in der Komplexität (z. B. der Rauigkeit der Oberfläche) unterscheiden.

Für faserartige Objekte, die aufgrund ihrer gekrümmten und/oder verdrehten Form (vgl. Abschnitt 4.3.2, Abbildung 4.6) mithilfe eines Größenvergleichs nicht klassifiziert werden können, besteht die Möglichkeit, mittels des Formfaktors  $f_2$  eine weitere Eingrenzung vorzunehmen. Aufgrund der verschlungenen Form ist das Integral der mittleren Krümmung groß. Dies hat einen kleinen Wert für den Formfaktor  $f_2$  zufolge. Für die in *Vecchio u. a. 2010* beschriebenen Versuche konnte für  $f_2 < 0,1$  von Fasern ausgegangen werden (unabhängig von ihrer Größe).

#### 4.3.4 Maximum Ferret Diameter

Der Durchmesser einer Punktwolke entspricht der größten Ausweitung im Raum. Bezogen auf ein Objekt bedeutet dies, dass die längste mögliche Strecke zwischen zwei Punkten im Objekt dem maximalen Durchmesser (maximum ferret diameter) entspricht.

#### 4.3.5 Elongation und Elongation Geodesic Index

Für die Verbindung zweier Punkte in einem Objekt bestehen unendlich viele Möglichkeiten. Die kürzeste Entfernung wird mittels des geodätischen Bogens ermittelt. Somit beschreibt die geodätische Distanz die kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten in einem Objekt (vgl. *Soille 1998*). Jedoch entspricht die Länge dieses Objektes (z. B. einer Faser) der Länge des maximalen geodätischen Bogens. Diese maximale Distanz wird „elongation“ genannt.

Für die Ermittlung wird zunächst ein beliebiger Startpunkt im Objekt gewählt und die jeweilige geodätische Distanz zu allen anderen Punkten im Objekt bestimmt. Mit dem so gefundenen Punkt (maximale geodätische Distanz) wird die Suche wiederholt. Die in diesem zweiten Schritt gefundene maximale geodätische Distanz entspricht dem gesuchten Parameter „elongation“  $L_g$ .

Mithilfe des „elongation geodesic index“  $IG_g$  kann ein Vergleich von Objekten bezüglich ihrer Schlankheit vorgenommen werden (vgl. *Parra-Denis u. a. 2008*).

$$IG_g = \frac{\pi L_g^3}{6V} \quad (4.4)$$

Ausgehend von einem Wert „1“ bei einer Kugel, steigen die Werte mit der Länge des Objektes an.

#### 4.3.6 Maximum Local Thickness

Mittels der Parameter Länge, Breite und Dicke der „bounding box“ lässt sich die reale Dicke eines Objektes nicht beschreiben. Der Durchmesser einer maximal großen Kugel, die in das Objekt passt, gibt den inneren Durchmesser („maximal local thickness“) des Objektes an.



## 4.4 Segmentierung des Fasersystems

### 4.4.1 Binarisierung

Wie zuvor beschrieben, entstehen bei der Aufnahme von Probekörpern für jede Winkelposition einzelne Projektionsbilder (Röntgenaufnahmen). Nach erfolgreicher tomografischer Rekonstruktion wird auf Basis der Einzelaufnahmen ein dreidimensionaler Datensatz erzeugt. Wie aus dem medizinischen Bereich bekannt, lassen sich zur visuellen Bewertung des aufgenommen Körpers aus den dreidimensionalen Daten zweidimensionale Schnitte (slices) generieren (vgl. Abbildung 4.7).

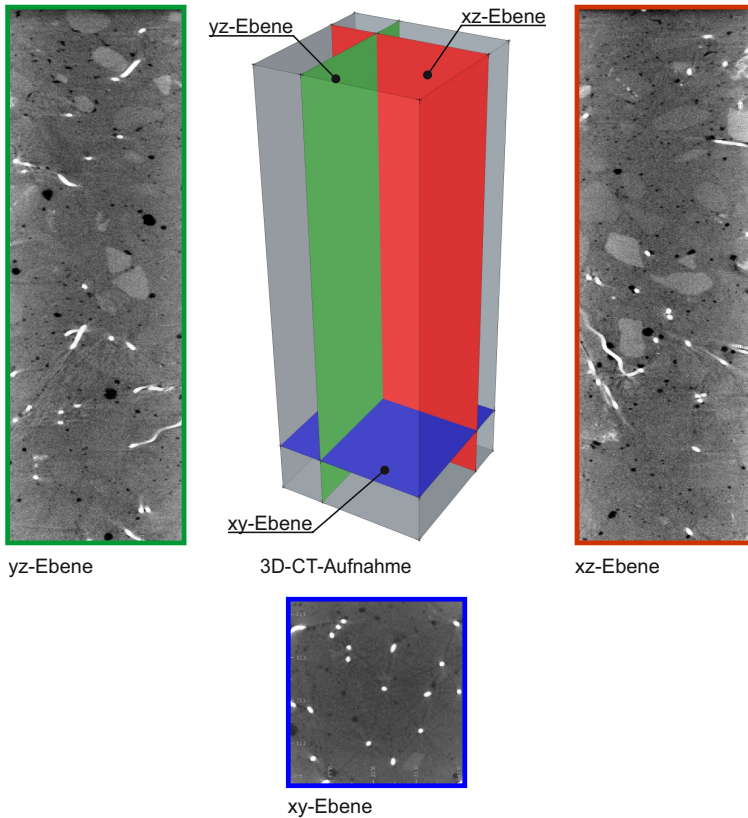


Abb. 4.7: Beispielhafte Darstellung aus CT-Aufnahmen generierter Schnittbilder (slices)

Bei genauer Betrachtung der Schnittflächen lassen sich die Bestandteile (Zementmatrix, Gesteinskörnung, Fasern und Luft) des Verbundwerkstoffes Stahlfaserbeton erkennen. Aufgrund ihres hohen Absorptionskontrastes (hohe Dichte des Stahls gegenüber den sonstigen Bestandteilen) lassen sich die Stahlfasern (heller Grauwert) besonders gut erkennen.

Das segmentierte Fasersystem bildet die Grundlage für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen. Unter Segmentierung versteht man im vorliegenden Fall das

„Herausfiltern“ der Fasern. Die Trennung der Fasern von der Betonmatrix und eventuell anderen vorhandenen Objekten, kann mithilfe eines sogenannten Schwellwertverfahrens durchgeführt werden. Die rekonstruierten  $\mu$ CT-Aufnahmen liegen in einem 16-bit Graustufenformat vor, d. h. in Abstufungen von 0 (schwarz) bis 65.536 (weiß). Zur Reduzierung der nötigen Rechenleistung und der damit verbundenen Zeitersparnis bei der Bearbeitung der Bilder lassen sich die Aufnahmen in ein 8-bit Format mit Grauwertabstufungen von 0 bis 255 umwandeln. Bei der Segmentierung mithilfe eines Schwellwertes werden nur einzelne Voxel (dreidimensionale Pixel) betrachtet. Der Grauwert eines Voxels stellt einen reinen Helligkeitswert dar, nach dem jedes Voxel einer Gruppe (Segment) zugeordnet wird (vgl. *Steinbrecher 1993*). Der Schwellwert, der das Kriterium für die Trennung der Grauwerte in zwei Gruppen angibt, wird im Bearbeitungsdialog „Binarisierung“ des verwendeten Analyseprogramms MAVI interaktiv bestimmt (vgl. Abbildung 4.8). Das Ergebnis der Segmentierung ist ein Binärbild mit nur zwei Werten „0“ (schwarz) und „1“ (weiß). Den Voxeln, die im vorliegenden Fall zur Faser gehören, wird der Wert „1“ zugeordnet.

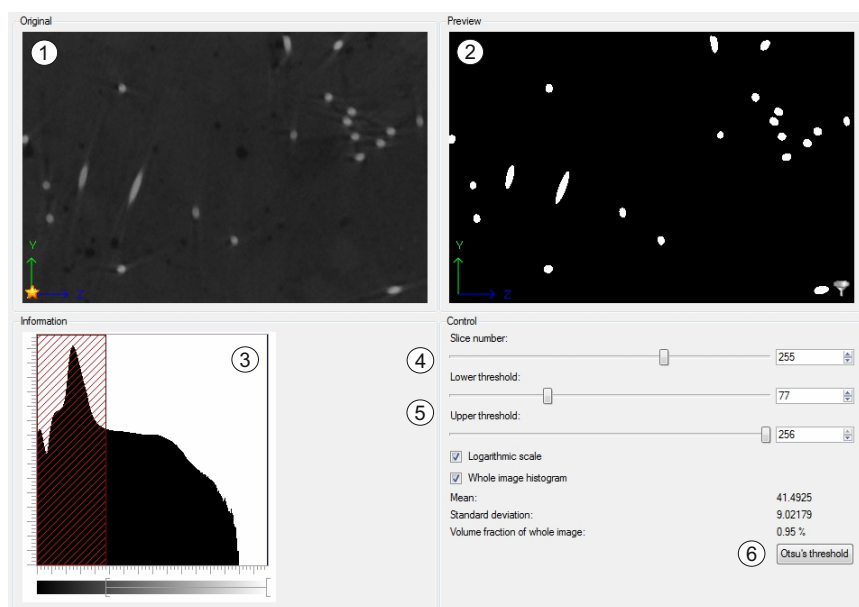


Abb. 4.8: Bearbeitungsdialog „Binarisierung“ des Analyseprogramms

- ① Original-Grauwertbild (vorgewählte Schnittfläche (slice))
- ② Segmentierungsergebnis (binarisiertes Bild)
- ③ Histogramm der Grauwertverteilung (logarithmische Darstellung)
- ④ Auswahl der Schnittebene (slices)
- ⑤ Gewählter Schwellwert
- ⑥ Algorithmus zur Ermittlung des Schwellwertes

In der rekonstruierten tomografischen Aufnahme entspricht der Grauwert jedes Voxels dem mittleren Absorptionsvermögen des entsprechenden Würfels in der Struktur. An den Grenzen zwischen Komponenten mit sehr verschiedener Röntgenabsorption führt der sogenannte Teilvolumeneffekt zu einer Aufweichung der Kanten. D. h., der Grauwert von Voxeln am Rand der Fasern ist niedriger als im Faserkern, da der Grauwert ein

gewichtetes Mittel aus Absorption des Stahls und der Betonmatrix ist. Dieser Umstand macht eine automatische Ermittlung des optimalen Schwellwertes mit dem im Analyseprogramm implementierten Algorithmus schwierig. Zur bestmöglichen Segmentierung der Fasern wird in einem ersten Schritt der im Binärbild gemessene Durchmesser sowohl mit dem tatsächlichen Faserdurchmesser als auch mit dem Original-Grauwertbild verglichen. Im zweiten Schritt wird der vom Analyseprogramm ermittelte mittlere Faserdurchmesser zur Überprüfung des Binärbildes herangezogen. Auf den Einfluss des gewählten Schwellwertes auf das Segmentierungsergebnis und die Analyse des Fasersystems wird in Abschnitt 5.4.3 näher eingegangen.

#### 4.4.2 Bildverbesserung

Für die vorgestellten Untersuchungen kamen Stahlfaserbetone mit ähnlicher Zusammensetzung zum Einsatz. Folglich lagen für die CT-Aufnahmen gleichbleibende Materialkennwerte vor. Mit der zur Verfügung stehenden Aufnahmetechnik konnte bei zylindrischen Körpern mit Durchmessern bis ca. 70 mm eine optimale Bildqualität ohne zusätzliche Anwendung von Filtern erreicht werden. Größere Durchmesser und insbesondere prismatische Körper mit unterschiedlichen zu durchstrahlenden Materialstärken erzeugten vergleichsweise schlechte Bildqualitäten (unterschiedliche Grauwertverläufe etc.).

Infolge dessen wurde die Anwendung verschiedener Filter zur Bildverbesserung unumgänglich. Wie Abbildung 4.9 zeigt, bleiben nach dem Segmentieren unzählige Einschlüsse in unterschiedlichen Größen vorhanden. Solche störenden Objekte lassen sich bis zu einer gewissen Größenordnung mittels eines Objektfilters (vgl. Abschnitt 4.2.5) entfernen. Dies war aber aufgrund der hohen Anzahl von Objekten im vorliegenden Fall nicht zielführend.

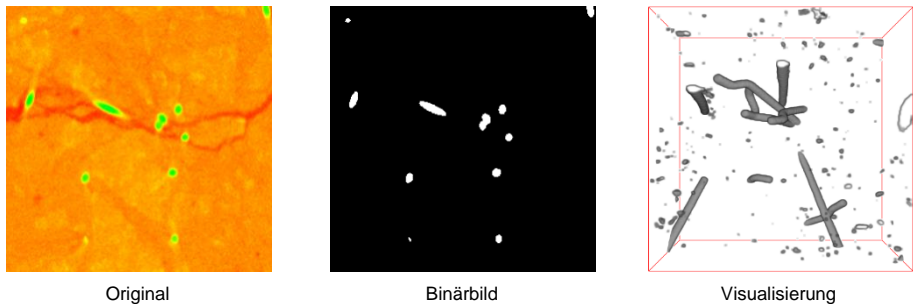


Abb. 4.9: Segmentierungsergebnis eines unbearbeiteten Bildes am Beispiel eines Bildausschnitts (Schnittfläche orthogonal zur y-Achse)

- links: Original-Grauwertbild, die Grauwerte wurden zur besseren Darstellung in ein Regenbogenspektrum transformiert
- mitte: Ergebnis der Segmentierung
- rechts: Visualisierung des Segmentierungsergebnisses (Volumenausschnitt)

Für eine Verbesserung der Bildqualität wurden im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit eine Vielzahl von Filtern und Filtereinstellungen getestet. Im Folgenden beschränkt

sich die Erläuterung auf die tatsächlich verwendeten Filter und deren Einstellungen. Allgemeine Informationen zu den verwendeten Filtern können Abschnitt 4.2 entnommen werden.

Über die kombinierte Anwendung eines Median-Filters mit einer kubischen Maske (drei Pixel Kantenlänge) und der Opening-Operation mit einer ebenfalls kubischen Maske (15 Pixel Kantenlänge) auf das Originalbild entstand ein Bild, das näherungsweise die für die Segmentierung der Fasern störenden bzw. irrelevanten Grauwerte abbildete (vgl. Abbildung 4.10). Dies betrifft Bereiche mit dünnen Linien (Risse) und der Faser ähnlichen Grauwerten (Teilbereiche der Gesteinskörnung).

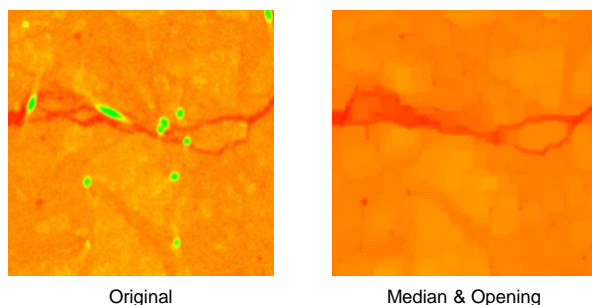


Abb. 4.10: Vergleich zwischen Originalbild und Filterergebnis am Beispiel eines Bildausschnitts (Schnittfläche orthogonal zur y-Achse). Die Grauwerte wurden zur besseren Darstellung in ein Regenbogenspektrum transformiert

links: Original Grauwertbild  
rechts: Ergebnis der kombinierten Anwendung des Median-Filters und der Opening-Funktion

Die Auswirkungen der Kombination von Median-Filter und Opening-Operation auf die Grauwertverteilung kann auch anhand der Grauerthistogramme verdeutlicht werden (vgl. Abbildung 4.11). Die Verschiebung der Häufigkeit in den „schwarzen“ Bereich (links) bedeutet zeitgleich eine Reduzierung von „hellen“ Bereichen, die im Bereich der Grauwerte der Stahlfasern liegen.

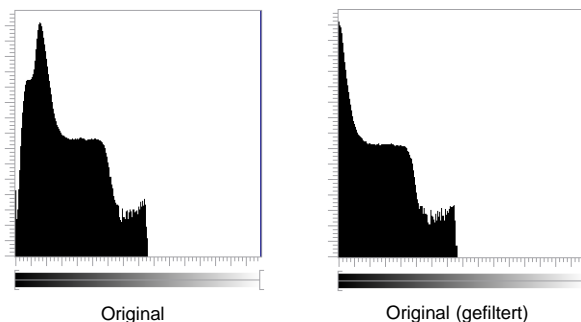


Abb. 4.11: Histogramm der Grauwertverteilung (logarithmische Darstellung)

links: Grauwertverteilung des Originalbilds  
rechts: Grauwertverteilung des gefilterten bzw. verbesserten Bilds

Wird nun dieses Filterergebnis vom Originalbild subtrahiert, werden störende Grauwerte entfernt und die Fasern hervorgehoben. Das Resultat der Bildverbesserung ist ein Bild, das ein besseres Segmentierungsergebnis liefert. Das binarisierte Bild beinhaltet deutlich weniger störende Objekte (vgl. Abbildung 4.12), die problemlos mit dem Objektfilter (vgl. Abschnitt 4.2.5) entfernt werden können.

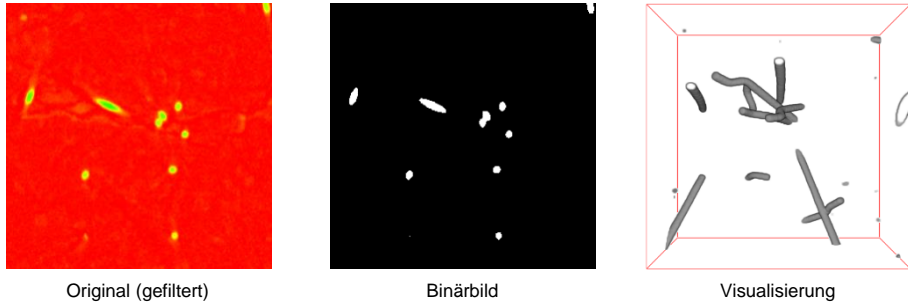


Abb. 4.12: Segmentierungsergebnis eines mit Filtern bearbeiteten Bildes am Beispiel eines Bildausschnitts (Schnittfläche orthogonal zur y-Achse)

- links: gefiltertes Grauwertbild, Differenz aus Originalbild und Ergebnisses der kombinierten Anwendung des Median-Filters und der Opening-Funktion (die Grauwerte wurden zur besseren Darstellung in ein Regenbogen-spektrum transformiert)
- mitte: Ergebnis der Segmentierung
- rechts: Visualisierung des Segmentierungsergebnisses (Volumenausschnitt)

Mithilfe der in MAVI (vgl. *Schladitz u. Godehardt 2012*) implementierten Funktion „labeling“ ist es möglich, einzelne Objekte zu detektieren und diese mit einem Label zu versehen. Die „Erkennung“ von Objekten erfolgt über die Überprüfung von benachbarten Voxeln. Bei dem Ausgangsbild handelt es sich um ein Binärbild, d. h. es sind nur noch zwei Werte vorhanden „1“ (weiß) für die Fasern und „0“ (schwarz) für den Hintergrund. Über einen Vergleich von Voxeln mit dem Wert „1“ in einer vorher gewählten Nachbarschaft entscheidet der Algorithmus über die Zugehörigkeit. Liegen Objekte nahe beieinander oder berühren sie sich, bzw. liegen Voxel unterschiedlicher Objekte innerhalb des gewählten Rasters (Nachbarschaft), werden diese zu einem Objekt verbunden (vgl. Abbildung 4.13, links). Das Ergebnis ist ein räumliches Bild mit einzelnen Objekten.

Durch die in diesem Kapitel vorgestellte kombinierte Anwendung von verschiedenen Vorgehensweisen konnten störende Einschlüsse auf ein Minimum reduziert werden (vgl. Abbildung 4.13).

#### 4.4.3 Visualisierung des Segmentierungsergebnisses

Nach durchgeführter Segmentierung ermöglicht das Analyseprogramm die Visualisierung des binarisierten Fasersystems. Diese dreidimensionale Betrachtungsmöglichkeit des Volumenkörpers erlaubt schon vor der mathematischen Analyse des Fasersystems eine visuelle Einschätzung der Orientierung und Verteilung der Fasern. Wie in Abbildung 4.14 (① und ②) dargestellt, können einzelne Bereiche des Volumenkör-

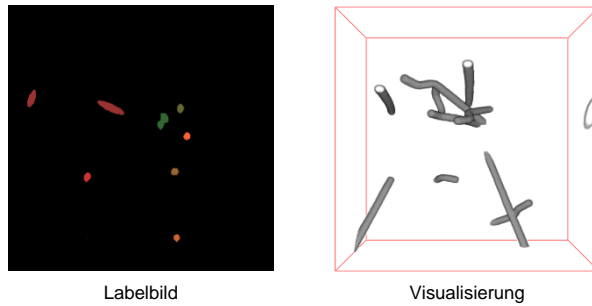


Abb. 4.13: Anwendung des Objektfilters zur Entfernung von störenden Einschlüssen

- links: Labelbild am Beispiel eines Bildausschnitts (Schnittfläche orthogonal zur y-Achse), Objektdarstellung in Farben
- rechts: Visualisierung des Ergebnisses der Bildverbesserung (Volumenausschnitt)

pers betrachtet und analysiert werden. Dies erlaubt zum Beispiel eine Beurteilung einer eventuellen Fasersedimentation durch Vergleich der Fasermenge und -orientierung unterschiedlicher Bereiche. Ferner lassen sich Form und Art der Fasern identifizieren (vgl. Abbildung 4.14 ③).

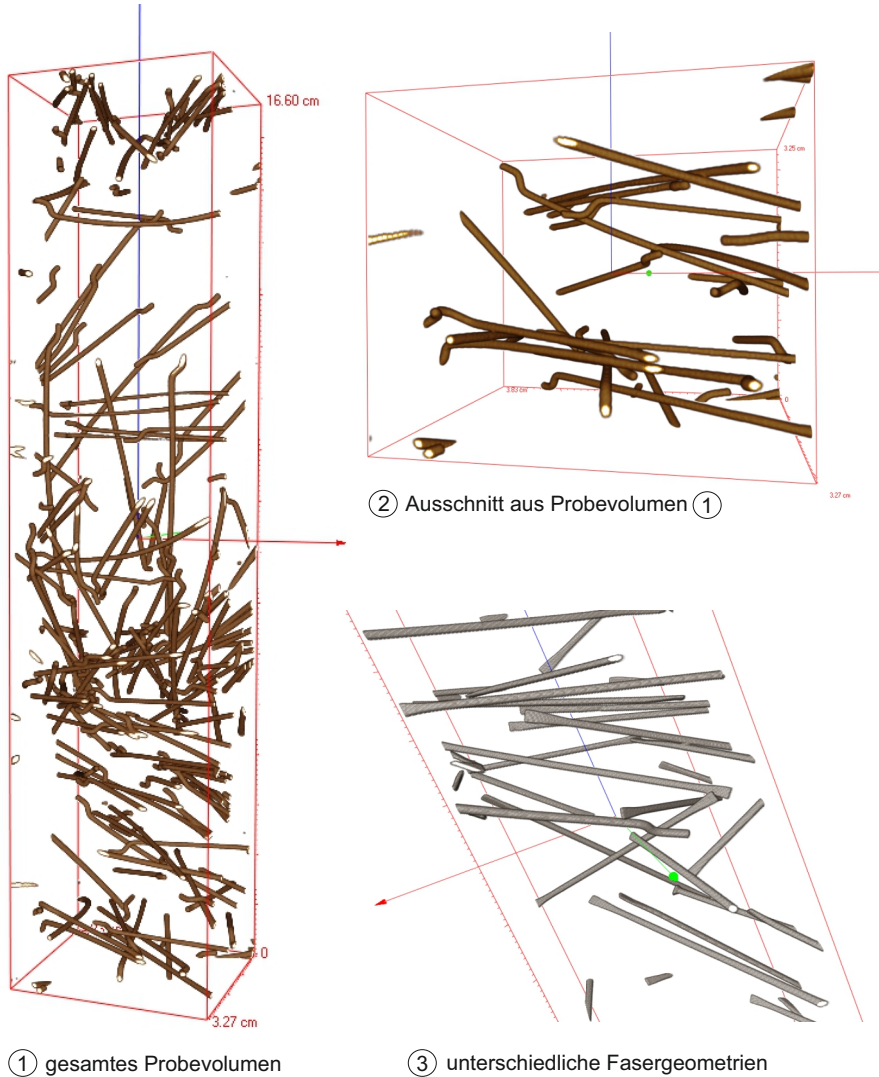


Abb. 4.14: Beispielhafte Darstellung der Visualisierungsmöglichkeiten

- ① 3D-Visualisierung von gekröpften Stahlfasern ( $l = 6 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$ ) in Beton, betrachtetes Volumen: ca.  $166 \text{ mm} \times 33 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ , Faserorientierungsbeiwerte:  $x = 0,56$ ,  $y = 0,58$ ,  $z = 0,36$ , bestimmter Fasergehalt:  $71 \text{ kg/m}^3$
- ② Ausschnitt aus dem unteren Bereich des Volumens (vgl. ①), betrachtetes Volumen: ca.  $38 \text{ mm} \times 33 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ , Faserorientierungsbeiwerte:  $x = 0,62$ ,  $y = 0,64$ ,  $z = 0,18$ , bestimmter Fasergehalt:  $47 \text{ kg/m}^3$
- ③ 3D-Visualisierungen unterschiedlicher Fasergeometrien; gekröpfte, abgeplattete und nagelkopfförmige Faserenden





## 5 Richtungsanalyse von Fasern in Beton

### 5.1 Einleitung

Im Fokus der in den folgenden Abschnitten erläuterten Untersuchungen stand die Entwicklung eines auf der Analyse von Durchstrahlungsaufnahmen basierenden Verfahrens zur Ermittlung der Orientierung, Verteilung und Menge von Fasern in Betonen. Dieses Verfahren sollte es u. a. ermöglichen, typische Fragestellungen hinsichtlich des Einflusses der Faserorientierung im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus zu beantworten.

Zur Beurteilung der Durchführbarkeit einer Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis von Computertomographie-Aufnahmen wurde zunächst eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen folgten mehrere aufeinander aufbauende Studien zum Einfluss der Fasergröße und -menge sowie der Probengröße.

Des weiteren werden Ergebnisse aus Untersuchungsreihen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, der am Fasersystem durchgeführten Analysen vorgestellt.

### 5.2 Globale Analyse des Fasersystems

Aus den Binärbildern (bestehend aus Vorder- und Hintergrund) können vier Basiskenngrößen bestimmt werden: Die Volumendichte  $V_V$ , die spezifische Oberfläche  $S_V$ , die Dichte des Integrals der mittleren Krümmung  $M_V$  und die Dichte des Integrals der totalen Krümmung  $K_V$  (Ohser u. Schladitz 2009). Ein entscheidender Vorteil dieser vier Kenngrößen liegt darin, dass sie sich sehr effizient aus räumlichen Bildern bestimmen lassen. Ferner können aus diesen vier Kenngrößen und einigen bei ihrer Berechnung anfallenden Zwischenergebnissen speziell zur Charakterisierung von Fasersystemen geeignete Dichten abgeleitet werden. Beispiele hierfür sind die spezifische Faserlänge  $L_V = M_V / (\pi(1 - V_V))$ , die mittlere Faserdicke  $S_V / (L_V \cdot \pi)$  und die Faserrichtungsverteilung in 13 diskreten Raumrichtungen. Diese Richtungen sind durch die Einheitszelle des Raumgitters gegeben - drei Koordinatenachsenrichtungen, sechs Flächendiagonalenrichtungen und vier Raumdiagonalenrichtungen. Im Normalfall entspricht die Vorrzugsrichtung einer der drei Hauptachsrichtungen.

Somit lässt sich der Faserorientierungsbeiwert (Definition s. Abschnitt 2.1.4) allgemein nach Gleichung 2.3 bestimmen.

Die Fasermenge bzw. das Faservolumen lässt sich über die Anzahl von Voxeln mit dem Wert „1“ und der erreichten Voxelgröße innerhalb des betrachteten Volumens bestimmen. Hierzu muss sich der Betrachtungsbereich innerhalb der Probe befinden.

Zur Beurteilung der Faserverteilung kann, wie in Abbildung 4.14 dargestellt, das aufgenommene Volumen bereichsweise betrachtet und analysiert werden.

### 5.3 Abgrenzung zu anderen Verfahren

Für die Faserrichtungsanalyse anhand von 3D-Bilddaten gibt es verschiedene algorithmische Zugänge: Analyse anhand der Faserquerschnittsform in virtuellen 2D Schnitten (*Barnett u. a. 2010*), Abtastung mit einer endlichen Anzahl von Richtungen (*Robb u. a. 2007*, *Illerhaus 2007*, *Sandau u. Ohser 2007*, *Weidemann u. a. 2007*, *Altendorf u. Jeulin 2009*) oder Bestimmung der lokalen Faserrichtung in jedem Pixel anhand der lokalen Grauwertableitung 1. oder 2. Ordnung (*Krause u. a. 2010*, *Pittino u. a. 2011*, *Suuronen u. a. 2013*). *Wirjadi u. a. 2016* zeigten, dass für die lokale Faserrichtungsanalyse die ableitungsbasierten Algorithmen am besten geeignet sind.

Bei der lokalen Richtungsanalyse wird lediglich die globale Faserrichtungsinformation benötigt. Diese kann aus den verallgemeinerten Projektionen gewonnen werden (Zwischenergebnisse bei der Messung der inneren Volumina). Hierzu bietet MAVI einen sehr effizienten Algorithmus, der u. a. Richtungsinformationen eines jeden Pixels bzw. Voxels im Datensatz nutzt. MAVI reduziert für die Berechnung der inneren Volumina bzw. deren Dichten (anhand von Binärbildern) im ersten Schritt die geometrischen Informationen im 3D-Bild auf den Vektor der Häufigkeiten der möglichen  $2 \times 2 \times 2$  Pixelkonfigurationen. Dieser Vektor hat konstant die Länge 256, unabhängig von der Größe der Eingabedaten. Aus ihm können durch Multiplikation mit geeigneten Gewichten alle inneren Volumina sowie z. B. die verallgemeinerten Projektionen gewonnen werden.

Dieser sehr robuste Algorithmus erlaubt nach erfolgter Segmentierung des Fasersystems eine sehr schnelle Analyse der Faserorientierung, wie sie für die Untersuchung von großen Prüfserien nötig ist.

## 5.4 Validierung des Analyseverfahrens

### 5.4.1 Allgemeines

Im Rahmen der in *Schuler u. Sych 2009* und *Schnell u. a. 2010* vorgestellten Arbeiten wurde die erste Machbarkeitsstudie zur Detektierbarkeit von Fasern in einer Betonmatrix durchgeführt. Zur Erprobung des Einflusses unterschiedlicher Auflösungen der Aufnahmen auf die Analyseergebnisse wurde bei diesen Versuchen die Größe der Probekörper variiert.

In der zweiten Versuchsreihe wurden Versuchskörper sowohl mit unterschiedlicher Geometrie und Betonzusammensetzung (UHPC, Feinkorn- und Normalbeton) untersucht. Anschließend wurden Untersuchungen zur Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt.

Aufgrund der Vielzahl der im Rahmen dieser Versuchsserien untersuchten Probekörper, beschränken sich die Ausführungen in diesem Abschnitt auf die aussagekräftigsten Versuchsergebnisse zur Darstellung des in den ersten Serien untersuchten Spektrums sowie den Anforderungen an Aufnahmetechnik und Analyse. Hierzu werden im Folgenden jeweils zwei Beispiele aus den Bereichen stahlfaserverstärkter Normalbeton und mit Mikrofasern bewehrter Feinkornbeton (UHPC) mit unterschiedlichen Probearmessungen gezeigt.

Diese ausgewählten Beispiele sollen die Abhängigkeit der Bildqualität und die damit verbundene Analysequalität von Probengröße und Fasergehalt verdeutlichen.

### 5.4.2 Einfluss unterschiedlicher Probeparameter

#### Kleines Volumen, geringer Fasergehalt (Probe 1)

Anhand dieser Probe wurde einer der ersten Versuche unternommen, Durchstrahlungsaufnahmen eines Stahlfaserbetons herzustellen und mithilfe des tomografisch rekonstruierten Datensatzes eine Analyse hinsichtlich der Menge und der Ausrichtung der Fasern durchzuführen.

Die Probe mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm x 50 mm wurde aus einem Standardbiegebalken herausgesägt. Dieser Balken entstammte einer Prüfserie mit einem Fasergehalt von  $60 \text{ kg/m}^3$ . Bei den verwendeten Fasern handelte es sich um kaltgezogene Stahldrahtfasern mit einem Durchmesser von ca. 1,0 mm und einer Länge von ca. 60 mm sowie beidseitig gekrümmten Enden zur mechanischen Verankerung.

Die Aufnahmen wurden am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltung (IIS) im Entwicklungszentrum für Röntgentechnik (EZRT), Fürth aufgenommen. Die Analyse sowie die Erstellung der Visualisierungen wurden gemäß den bereits vorgestellten Arbeitsschritten mithilfe der Software „MAVI“ durchgeführt. Aufgrund der relativ geringen zu durchstrahlenden Materialstärke, der wenigen im betrachteten Volumen befindlichen Fasern und dem hohen Kontrast der Stahlfasern (hohe Dichte gegenüber den anderen Bestandteilen) konnte ein sehr gutes Binarisierungsergebnis erreicht werden. Abbildung 5.1 zeigt das Ergebnis der Segmentierung des Fasersystems anhand zweier unterschiedlicher Perspektiven.

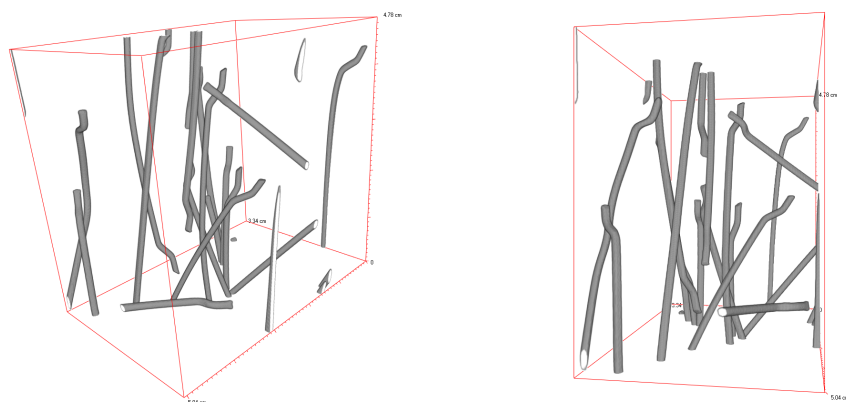


Abb. 5.1: Visualisierungen des Segmentierungsergebnisses der Probe 1

Aufgrund von Kantenabplatzungen am Probekörper musste der Untersuchungsbereich auf 33 mm x 50 mm x 48 mm beschnitten werden. Vor der Analyse wurden kleinere Einschlüsse mit ähnlichen Grauwerten (z. B. Artefakte) mit einem Objektfiler (vgl. Abschnitt 4.2.5) größtenteils entfernt.

Die in der vorliegenden Aufnahme erreichte Auflösung von 75,81  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$  ermöglichte eine detailreiche Darstellung der Fasern. Der angenommene Durchmesser der Fasern von ca. 1,0 mm entsprach demnach ca. 13 Pixel. Der in Abbildung 5.2 dargestellte Ausschnitt eines Schnittbildes zeigt, dass die Fasern jedoch keinen ideal runden Querschnitt aufwiesen. Die verwendeten Fasern erfahren bei der Herstellung ober- und unterseitig eine Abflachung des Querschnittes (vgl. auch Abbildung 5.3). Für die weiteren Analysen wurde vom angegebenen gemittelten Wert des Herstellers von 1,0 mm ausgegangen. Die Transformation der Grauwerte in ein Regenbogenspektrum ermöglichte zudem die bessere Darstellung des zuvor beschriebenen Abfalls der Grauwerte zum Faserrand (Übergang blau, türkis, grün), der eine automatische Ermittlung des Schwellwertes erschwerte.

Abbildung 5.3 stellt anhand eines Schnittbildes das Segmentierungsergebnis (Binärbild) dem Original-Grauwertbild gegenüber. Die deutliche Darstellung des Faserquerschnittes in den einzelnen Schnittbildern ermöglichte einen Abgleich des Durchmessers zwischen Binärbild und dem Original-Grauwertbild zur Ermittlung des idealen Schwellwertes. Somit konnte auch bei einem nicht kreisförmigen Querschnitt eine gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Faserdurchmesser erreicht werden.

Bezüglich der Probengröße ist anzumerken, dass es sich um eine relativ kleine Probe handelte, wenn man das Verhältnis der Fasergröße und -menge zum untersuchten Volumen betrachtet. Aufgrund des kleinen betrachteten Volumens und der geringeren Anzahl von Fasern (hier auch nur Teilstücke) ist ein aussagekräftiger Vergleich des analysierten Fasergehalts mit der zugegebenen Fasermenge nicht möglich.

Die mithilfe des Faserorientierungsbeiwertes  $\eta_z = 0,88$  dokumentierte starke Ausrichtung parallel zur vertikalen Achse z konnte anhand der Visualisierungen (vgl. Abbil-

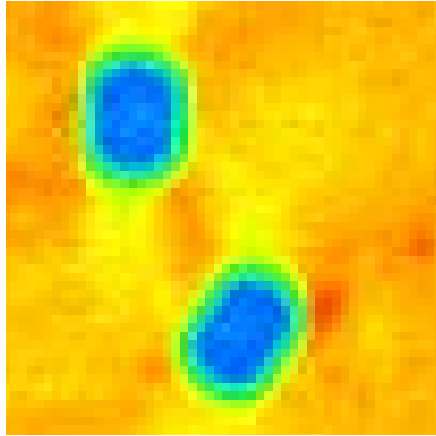


Abb. 5.2: Ausschnitt aus einer Schnittebene des Original-Grauwertbildes (Probe 1); die Grauwerte wurden zur besseren Darstellung in ein Regenbogenspektrum transformiert

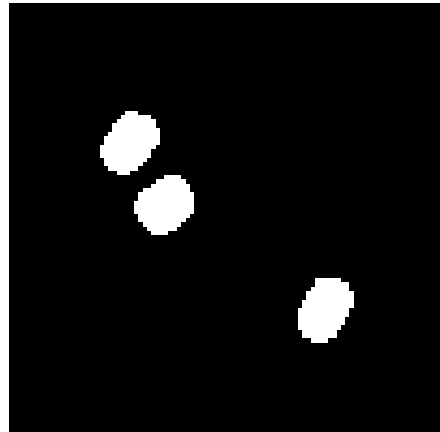
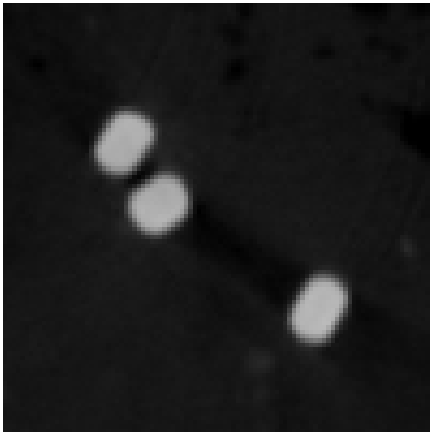


Abb. 5.3: Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses und des Original-Grauwertbilds bei einer Auflösung von  $75,81 \mu\text{m}$ , Bildausschnitt  $150 \times 150$  Pixel

dung 5.1) bestätigt werden. Die Faserorientierungsbeiwerte für die beiden horizontalen Achsen lagen bei  $\eta_x = 0,24$  und  $\eta_y = 0,23$ .

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Analyseergebnisse sowie die Beschreibung der Probe 1 können Tabelle 5.1 entnommen werden.

#### Großes Volumen, geringer Fasergehalt (Probe 2)

Bei Probe 2 handelte es sich um einen Bohrkern ( $d = 100 \text{ mm}$ ) aus einer  $160 \text{ mm}$  starken Deckenplatte aus Stahlfaserbeton. Gegenüber der zuerst aufgenommenen Probe 1 mit einer zu durchstrahlenden Diagonalen von ca.  $70 \text{ mm}$  und wenigen Fasern im untersuchten Volumen stellte der Durchmesser von  $100 \text{ mm}$  und der tatsächlich vorhandene höhere Fasergehalt innerhalb der Probe 2 eine größere Herausforderung hinsichtlich der Aufnahmetechnik und der Analyse dar.

Tab. 5.1: Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 1

<u>Probenbeschreibung:</u>			
Probenabmessung:	ca. 50 x 50 x 50 mm <sup>3</sup>	Faserart:	Stahlfaser (gekröpft)
Betonart:	Normalbeton	Faserabmessung:	d = 1 mm, l = 60 mm
Herkunft der Probe:	Standardbiegebalken, gesägt	Fasermenge:	60 kg/m <sup>3</sup>
<u>Analysebereich:</u>			
Abmessungen:	ca. 33 x 50 x 48 mm <sup>3</sup> (440 x 665 x 630 Pixel)		
erreichte Auflösung:	75,81 µm/Pixel		
Volumen:	8,03438e-05 m <sup>3</sup>		
<u>Analyseergebnisse:</u>			
Fasergehalt:	0,575 Vol.-% (45,1 kg/m <sup>3</sup> )	Faserdurchmesser:	1,047 mm
spezifische Faserlänge:	6.714,21 m/m <sup>3</sup>		
projizierte Faserlängen:	Faserorientierungsbeiwerte:		
$L_{p,x}$ =	0,128722 m	$\eta_x$ =	0,24
$L_{p,y}$ =	0,123036 m	$\eta_y$ =	0,23
$L_{p,z}$ =	0,472164 m	$\eta_z$ =	0,88

Aufgrund der Materialdicke und der relativ hohen Fasermenge in Probe 2 kam es durch Strahlauhärtung und -abschwächung zu unterschiedlichen Grauwertverläufen , so dass Fasern im Inneren der Probe nach der Binarisierung unterbewertet dargestellt wurden. Infolge der bei einer zylindrischen Probe immer gleichen zu durchstrahlenden Materialdicke kann dieser Effekt durch die Anwendung von Bildbearbeitungsfiltern reduziert werden.

Zunächst wurde das Grauwertbild für eine optimale Darstellung der inneren Fasern mit einem niedrigen Schwellwert binarisiert. Folglich wurden die Fasern im äußeren Bereich stark überbewertet dargestellt. Daraus resultierte ein erhöhter gemittelter Faserdurchmesser von ca. 1,3 mm. Mithilfe einer Opening-Operation und einem auf das Ergebnisbild angewandten Erosions-Filter (vgl. Abschnitt 4.2) konnten die stark überbewerteten Fasern dünner „dargestellt“ werden. Mit einem nach diesen Schritten analysierten mittleren Faserdurchmesser von 0,8 mm wurde der Zieldurchmesser von ca. 1,0 mm zwar um 0,2 mm unterschritten, jedoch wurde über diese Art der Bildverbesserung die ungleichmäßige Verteilung von Über- und Unterbewertung zwischen innen und außen liegenden Fasern reduziert. Auf Basis dieses Datensatzes wurde die Analyse durchgeführt.

Für die in Abbildung 5.4 dargestellte Visualisierung des Fasersystems wurde zur besseren Darstellung das Binärbild in ein 8-bit-Grauwertbild „aufgespreizt“ und mittels eines Mean-Filters (vgl. Abschnitt 4.2) die Faserkanten geglättet. Auf diese Weise entstehen weichere Kanten und die Fasern werden etwas dicker dargestellt.

Der Vergleich zwischen Abbildung 5.5 (Probe 2) und 5.3 (Probe 1) zeigen den Einfluss der Pixelgröße bzw. der Auflösung auf die Möglichkeit des händisch durchgeführten

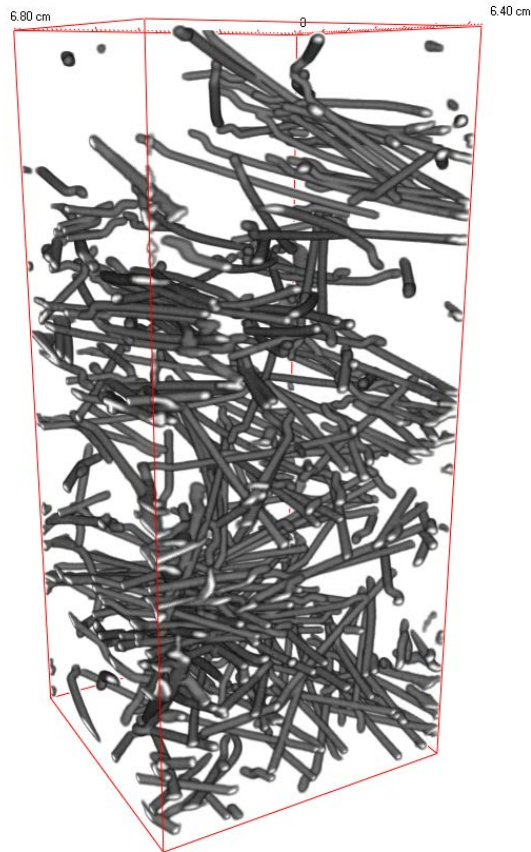


Abb. 5.4: Visualisierung des Fasersystems der Probe 2, das Segmentierungsergebnis wurde für die Visualisierung mittels Bildbearbeitungsfiltern angepasst

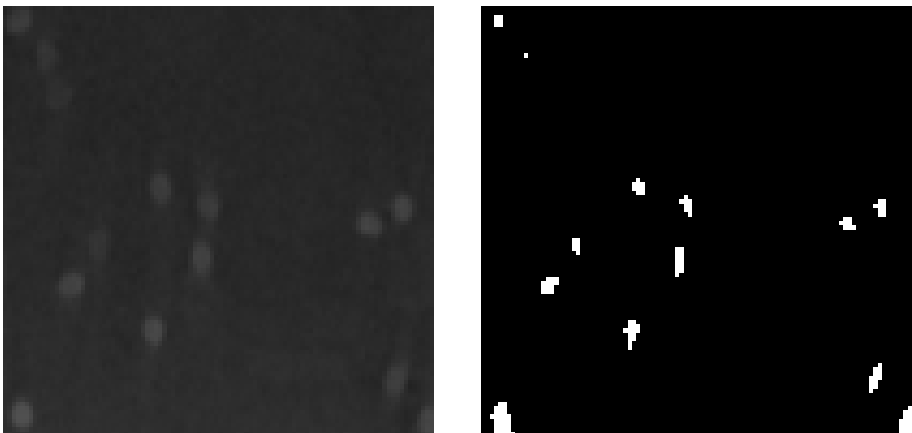


Abb. 5.5: Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses und des Original-Grauwertbilds bei einer Auflösung von 200  $\mu\text{m}$ , Bildausschnitt 150 x 150 Pixel

Abgleiches des Durchmessers am Binärbild und dem Original-Grauwertbild. Neben dem in Abbildung 5.5 ersichtlichen geringeren Kontrast stehen bei einer Auflösung von ca. 200  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$  maximal fünf Pixel zur Darstellung des Faserdurchmessers in den Schnittbildern zur Verfügung. Dies macht einen Abgleich zwischen dem Original-Grauwertbild und dem Binärbild schwierig. Für eine optimale Segmentierung musste der zu verwendende Schwellwert iterativ über das Analyseergebnis des gemittelten Faserdurchmessers ermittelt werden.

Im vorliegenden Fall reichte die Bildqualität in Abhängigkeit der erreichten Auflösung und der angewendeten Filter zur Bildverbesserung nicht für ein optimales Binarisierungsergebnis aus (Unterschätzung des Soll-Durchmessers der Fasern). Auf die Anwendung weiterer Filter zur Verbesserung der Bildqualität wurde in dieser frühen Phase der Arbeiten verzichtet.

Trotz der zuvor beschriebenen Unterschätzung des Faserdurchmessers konnte die Analyse hinsichtlich der Bestimmung der Faserorientierungsbeiwerte gute Ergebnisse liefern. Auf den Einfluss der Segmentierungsqualität bei der Ermittlung des Faserorientierungsbeiwertes wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

Die Faserorientierungsbeiwerte  $\eta_x = 0,72$  und  $\eta_y = 0,47$  deuteten auf eine deutliche zweidimensionale (parallel zu den Schalungsflächen) Ausrichtung der Fasern hin. Hierbei zeigte sich mit  $\eta_x = 0,72$  eine ausgeprägte Orientierung der Fasern parallel zur Vordruckrichtung, die der Zugkrafttrichtung der Decke entspricht.

Über die visuelle Auswertung der dreidimensionalen Darstellung des Fasersystems konnte eine leichte Sedimentation der Fasern festgestellt werden. Für eine genauere Beurteilung können beliebige Bereiche des Probekörpers analysiert und miteinander verglichen werden. Eine solche Untersuchung war jedoch zum Zeitpunkt dieser Machbarkeitsstudie nicht Bestandteil des Arbeitspaketes.

Für eine genaue Ermittlung der Fasermenge im untersuchten Volumen werden grundsätzlich Aufnahmen mit besserem Kontrast und einer höheren Auflösung benötigt. Im Rahmen der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden weitere Versuche unternommen, mittels der Anwendung von Bildbearbeitungsfiltern die Qualität der Binarisierungsergebnisse dahingehend zu verbessern, dass auch bei einer „schlechten“ Ausgangsqualität der Aufnahme eine Analyse für eine aussagekräftige Ermittlung der Faserorientierung und Fasermenge möglich ist.

Eine Beschreibung der Probe 2 sowie die wichtigsten Analyseergebnisse wurden in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

### **Kleines Volumen, hoher Fasergehalt (Probe 3)**

Probe 3 wurde aus einem Randbereich eines UHPC-Balkens (Feinkornbeton mit Druckfestigkeiten  $> 150 \text{ MPa}$ ) mit einem Größtkorn von 0,5 mm und einem Mikrostahlfasergehalt ( $l/d = 6,0 \text{ mm}/0,175 \text{ mm}$ ) von  $144 \text{ kg}/\text{m}^3$  entnommen.

Aufgrund des hohen Fasergehaltes wurde zunächst eine kleine Probe mit den Abmessungen  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  tomographiert und der Analyse zugeführt. Angesichts der geringeren Probegröße und der damit verbundenen Möglichkeit der Ausnutzung der geometrischen Vergrößerung konnte eine hohe Auflösung von  $9,77 \mu\text{m}$  erzielt werden.



Tab. 5.2: Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 2

Probenbeschreibung:

Probenabmessung:	d = 100 mm, h = 160 mm	Faserart:	Stahlfaser, gekröpft
Betonart:	Normalbeton	Faserabmessung:	d = 1 mm, l = 60 mm
Herkunft der Probe:	Bohrkern aus einer Decke	Fasermenge:	60 kg/m <sup>3</sup>

Analysebereich:

Abmessungen:	ca. 64 x 68 x 155 mm <sup>3</sup> (320 x 340 x 775 Pixel)
erreichte Auflösung:	200 µm/Pixel
Volumen:	6,7456e <sup>-4</sup> m <sup>3</sup>

Analyseergebnisse:

Fasergehalt:	0,853 Vol.-% (67 kg/m <sup>3</sup> )	Faserdurchmesser:	0,800 mm
spezifische Faserlänge:	18.321,1 m/m <sup>3</sup>		
projizierte Längen:		Faserorientierungsbeiwerte:	
$L_{p,x} =$	8,8973 m	$\eta_x =$	0,72
$L_{p,y} =$	5,74925 m	$\eta_y =$	0,47
$L_{p,z} =$	3,11405 m	$\eta_z =$	0,25

Für den manuellen Abgleich des Faserdurchmessers im binarisierten Bild mit dem Durchmesser im Original-Grauwertbild standen bei einer idealen Darstellung ca. 17 Pixel zur Verfügung. Abbildung 5.6 stellt das Binarisierungsergebnis dem Original-Grauwertbild gegenüber. Anhand der Betrachtung solcher Schnitte kann mithilfe des einfachen Zählens der Pixel, die den Durchmesser der Faser abbilden, das Segmentierungsergebnis überprüft werden.

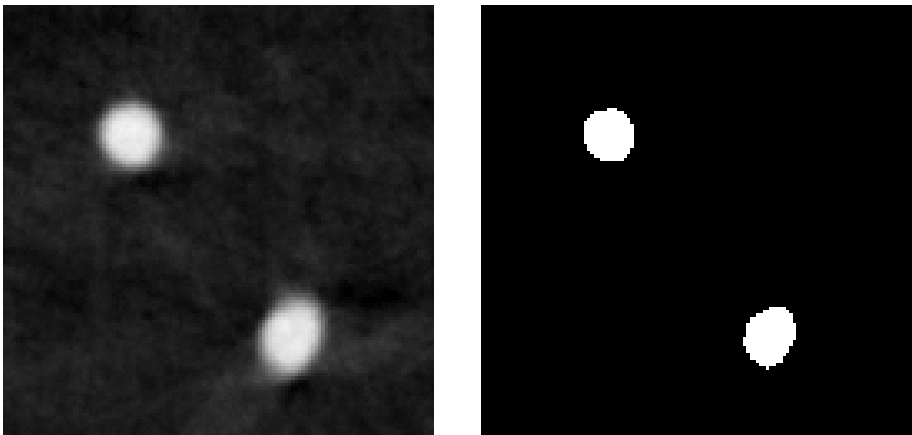


Abb. 5.6: Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses und des Original-Grauwertbilds bei einer Auflösung von 9,77 µm, Bildausschnitt 130 x 130 Pixel

Analog zu den Anmerkungen zu Probe 1 konnte aufgrund der hohen Auflösung und dem vorliegenden guten Kontrast zwischen Faser und Hintergrund das Fasersystem sehr gut segmentiert werden. Sowohl die visuelle Überprüfung als auch der analysierte mittlere Faserdurchmesser von 0,173 mm konnten das gute Segmentierungsergebnis bestätigen. Das Ergebnis der Segmentierung wurde in Abbildung 5.7 in Form zweier Visualisierungen aus unterschiedlichen Perspektiven dargestellt.

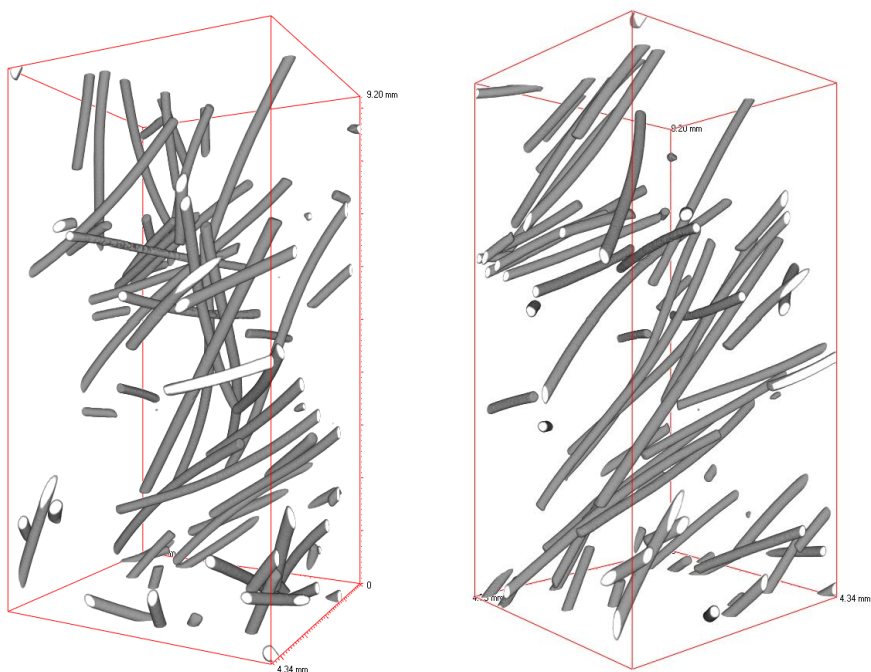


Abb. 5.7: Visualisierungen des Segmentierungsergebnisses der Probe 3

Trotz der kleinen Probenabmessung und dem damit verbundenen Umstand, dass sich nur sehr wenige Fasern vollständig innerhalb des untersuchten Volumens befanden, konnte eine homogene Verteilung der Fasern im untersuchten Volumen festgestellt werden (visuell).

Der Vergleich der Faserorientierungsbeiwerte ( $\eta_x = 0,53$ ,  $\eta_y = 0,44$  und  $\eta_z = 0,58$ ) zeigte eine parallele Ausrichtung der Fasern sowohl zur x-z-Ebene als auch zur x-y-Ebene. Dies bestätigte sich auch bei Betrachtung der Visualisierungen (vgl. Abbildung 5.7) mit einer nahezu diagonalen Ausrichtung der Fasern in diesen Ebenen.

Wie zuvor beschrieben, konnte aufgrund der guten Bildqualität, der hohen Auflösung und des nun bekannten genauen Faserdurchmessers das Fasersystem sehr genau segmentiert werden. Dies ermöglichte eine genaue Bestimmung des Fasergehaltes. Die analysierte Fasermenge von  $153,9 \text{ kg/m}^3$  liegt etwas über dem Soll-Wert von  $144 \text{ kg/m}^3$ .

Eine Beschreibung der Probe 3 sowie die wichtigsten Analyseergebnisse wurden in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tab. 5.3: Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 3

<u>Probenbeschreibung:</u>			
Probenabmessung:	ca. 5 x 5 x 10 mm <sup>3</sup>	Faserart:	Mikrofaser, glatt
Betonart:	UHPC	Faserabmessung:	d = 0,175 mm, l = 6 mm
Herkunft der Probe:	Biegebalken	Fasermenge:	144 kg/m <sup>3</sup>
<u>Analysebereich:</u>			
Abmessungen:	ca. 4,46 x 4,63 x 9,11 mm <sup>3</sup> (456 x 474 x 932 Pixel)		
erreichte Auflösung:	9,77 µm/Pixel		
Volumen:	1,8761e <sup>-07</sup> m <sup>3</sup>		
<u>Analyseergebnisse:</u>			
Fasergehalt:	1,96 Vol.-% (153,9 kg/m <sup>3</sup> )	Faserdurchmesser:	0,173 mm
spezifische Faserlänge:	792.477 m/m <sup>3</sup>		
projizierte Längen:	Faserorientierungsbeiwerte:		
$L_{p,x}$ =	0,0794602 m	$\eta_x$ =	0,53
$L_{p,y}$ =	0,0661033 m	$\eta_y$ =	0,44
$L_{p,z}$ =	0,0848060 m	$\eta_z$ =	0,58

### Großes Volumen, hoher Fasergehalt (Probe 4)

Probe 4 wurde aus dem gleichen Balken wie Probe 3 entnommen. Die Abmessungen von 50 mm x 50 mm x 50 mm und die sich daraus ergebende zu durchstrahlende Diagonale von ca. 70 mm stellten in Verbindung mit dem hohen Fasergehalt von 144 kg/m<sup>3</sup> die bisher höchsten Anforderungen an die Aufnahmetechnik.

Zur Reduzierung des Einflusses der Strahlaufhärtung wurde bei den Aufnahmen, die an der Hochschule Aalen durchgeführt wurden, ein Aluminium-Filter verwendet (vgl. Kapitel 3).

Bei der erzielten Auflösung von ca. 80 µm/Pixel stehen bei einer senkrecht geschnittenen Faser nur 2 Pixel zur Darstellung des Durchmessers zur Verfügung. Wie Abbildung 5.8 zeigt, kann der visuelle Abgleich mithilfe der Pixelanzahl im Binärbild und dem Original-Grauwertbild nur bedingt erfolgen. Im vorliegenden Fall musste der zur Segmentierung des Fasersystems erforderliche Schwellwert anhand der Analyseergebnisse (gemittelter Faserdurchmesser) iterativ ermittelt werden.

Mittels der verwendeten Aufnahmetechnik sowie der in der Rekonstruktionssoftware implementierten Bildaufbereitung konnten qualitativ gute Aufnahmen erstellt werden. In Kombination mit dem beschriebenen stufenweisen „Herantasten“ an den optimalen Schwellwert, konnte nach bestmöglicher Binarisierung, der gemittelte Faserdurchmesser mit 0,176 mm ermittelt werden.

Abbildung 5.9 zeigt das Ergebnis der Segmentierung in Form zweier Visualisierungen aus unterschiedlichen Perspektiven. Aufgrund des guten Binarisierungsergebnisses und der Einhaltung des tatsächlichen Durchmessers konnte der Fasergehalt zielsicher

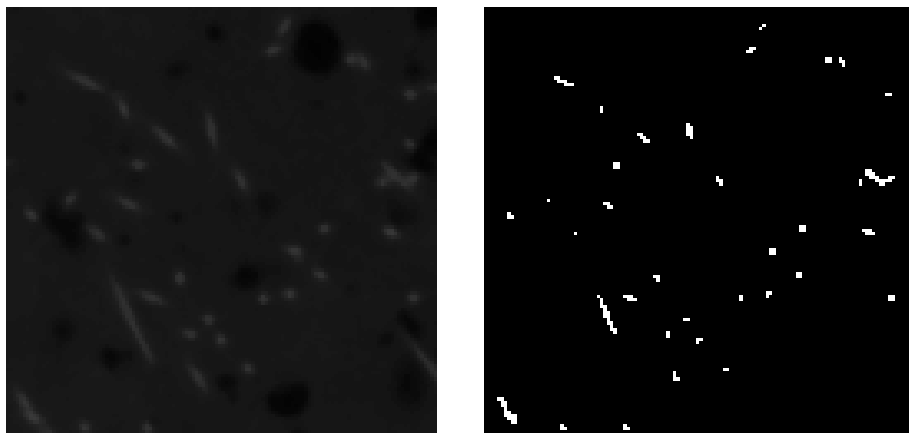


Abb. 5.8: Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses und des Original-Grauwertbilds bei einer Auflösung von 80 µm, Bildausschnitt 130 x 130 Pixel

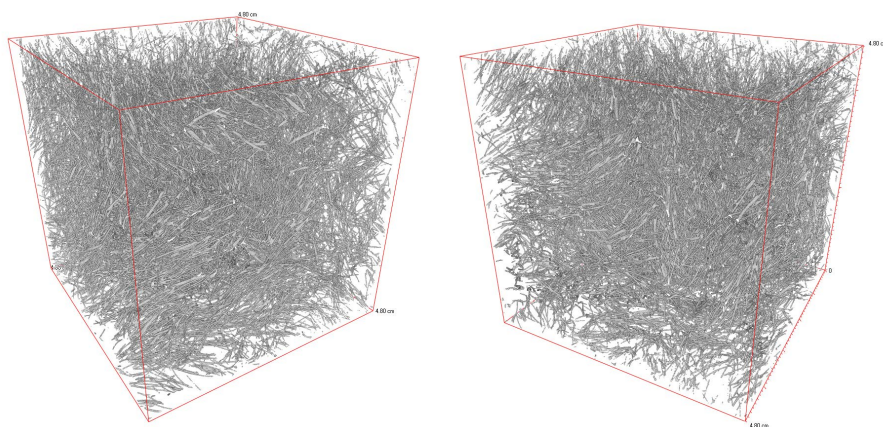


Abb. 5.9: Visualisierungen des Segmentierungsergebnisses der Probe 4

ermittelt werden. Der ermittelte Fasergehalt von  $144 \text{ kg/m}^3$  entspricht exakt dem Soll-Wert. Entgegen dem Volumen der Probe 3 von ca.  $0,19 \text{ cm}^3$  entspricht das Volumen der Probe 4 mit ca.  $100 \text{ cm}^3$  dem etwa 500-fachen. Aufgrund dieses im Verhältnis zu Fasergröße und -menge großen untersuchten Volumens, fallen Inhomogenitäten der Faserverteilung bei der Bestimmung der Fasermenge weniger ins Gewicht.

Gegenüber den Proben 1 bis 3, die zum einen größere Fasern mit einer geringen Dosierung und zum anderen nur kleine Volumen aufwiesen, ließ sich in der größeren Probe 4 mit hoher Faserdosierung die Orientierung der Fasern nicht mehr an einer einzelnen dreidimensionalen Darstellung visuell abschätzen. Bei Betrachtung des gesamten Volumens zeigten die ermittelten Faserorientierungsbeiwerte ( $\eta_x = 0,47$ ,  $\eta_y = 0,47$  und  $\eta_z = 0,58$ ) eine nahezu isotrope Ausrichtung der Fasern. Die Tabelle 5.4 fasst die Analyseergebnisse sowie die Eigenschaften der Probe 4 zusammen.

Tab. 5.4: Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 4

<u>Probenbeschreibung:</u>			
Probenabmessung:	ca. 48 x 48 x 48 mm <sup>3</sup>	Faserart:	Mikrofaser, glatt
Betonart:	UHPC	Faserabmessung:	d = 0,175 mm, l = 6 mm
Herkunft der Probe:	Biegebalken	Fasermenge:	144 kg/m <sup>3</sup>
<u>Analysebereich:</u>			
Abmessungen:	ca. 46,8 x 46,8 x 46,8 mm <sup>3</sup> (600 x 600 x 600 Pixel)		
erreichte Auflösung:	78,01 µm/Pixel		
Volumen:	1,02543e <sup>-4</sup> m <sup>3</sup>		
<u>Analyseergebnisse:</u>			
Fasergehalt:	1,83 Vol.-% (144 kg/m <sup>3</sup> )	Faserdurchmesser:	0,176 mm
spezifische Faserlänge:	599.124 m/m <sup>3</sup>		
projizierte Längen:	Faserorientierungsbeiwerte:		
$L_{p,x}$ =	29,0034 m	$\eta_x$ =	0,47
$L_{p,y}$ =	28,9792 m	$\eta_y$ =	0,47
$L_{p,z}$ =	35,3889 m	$\eta_z$ =	0,58

Die Analyse von Teilbereichen erlaubt eine differenzierte Betrachtungsweise. Aus dem Datensatz der Größe 600 x 600 x 600 Pixel wurden drei Teilvolumina (150 x 150 x 150 Pixel) „herausgeschnitten“ und einzeln analysiert (vgl. Abbildung 5.10).

Die Lage der Teilbereiche kann Abbildung 5.11 entnommen werden. Die beiden im äußeren Bereich befindlichen Teilvolumen ① + ③ erreichen nach der Segmentierung mit einem Schwellwert von „163“ einen gemittelten Faserdurchmesser von 0,171 mm. Unter Verwendung des gleichen Schwellwertes wurde für das aus der Mitte der Gesamtprobe stammende Teilvolumen ② ein gemittelter Faserdurchmesser von 0,165 mm bestimmt. Diese Abweichung resultiert aus einem durch Strahlaufhärtung und -abschwächung unterschiedlichen Grauwertverlauf zum Inneren der Probe hin und einer damit verbundenen Unterbewertung nach der Segmentierung. Theoretisch könnte über einen für dieses Teilvolumen angepassten Schwellwert ein besseres Segmentierungsergebnis erzielt werden. Jedoch waren bei dem vorliegenden Datensatz die Möglichkeiten zur Auswahl eines Schwellwertes limitiert. Die Aufnahmen lagen nur in einem 8-bit-Graustufenformat vor. Somit standen nur 256 Grauwerte für die Setzung des Schwellwertes zur Verfügung. Für die hier vorliegenden Aufnahmen mit niedriger Auflösung und relativ schlechtem Kontrast bieten 16-bit-Aufnahmen mit 65.536 Grauwerten die Möglichkeit deutlich feinerer Abstufungen.

Aufgrund der erläuterten Unterbewertung der innen liegenden Fasern kann auch der ermittelte Fasergehalt von 133,5 kg/m<sup>3</sup> als zu niedrig bzw. unterbewertet angesehen werden.

Wie im nächsten Abschnitt erläutert spielen etwaige Unter- oder Überbewertungen der Fasern bzw. des Fasersystems (in einem bestimmten Rahmen) bei der Ermittlung

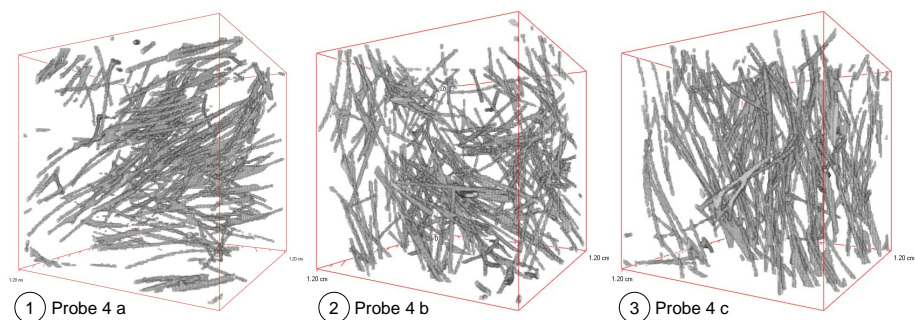


Abb. 5.10: Visualisierungen der Teilvolumina aus Probe 4

- ① gemittelter Faserdurchmesser:  $d = 0,171 \text{ mm}$ , Faserorientierungsbeiwerte:  $\eta_x = 0,55$ ,  $\eta_y = 0,56$ ,  $\eta_z = 0,40$ ; Fasergehalt:  $133,5 \text{ kg/m}^3$
- ② gemittelter Faserdurchmesser:  $d = 0,165 \text{ mm}$ , Faserorientierungsbeiwerte:  $\eta_x = 0,41$ ,  $\eta_y = 0,52$ ,  $\eta_z = 0,60$ ; Fasergehalt:  $133,5 \text{ kg/m}^3$
- ③ gemittelter Faserdurchmesser:  $d = 0,171 \text{ mm}$ , Faserorientierungsbeiwerte:  $\eta_x = 0,35$ ,  $\eta_y = 0,32$ ,  $\eta_z = 0,79$ ; Fasergehalt:  $142,9 \text{ kg/m}^3$

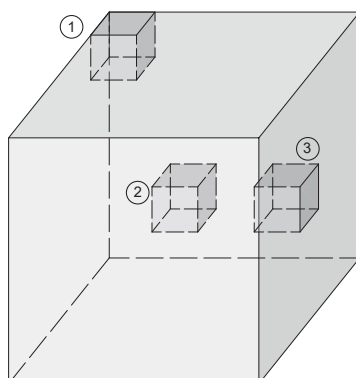


Abb. 5.11: Lage der untersuchten Teilvolumen

der Faserorientierungsbeiwerte eine geringere Rolle. Demzufolge können die Faserorientierungsbeiwerte der drei Teilvolumina direkt miteinander verglichen werden. Es zeigten sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Vorzugsrichtung. Während sich die Fasern in ① eher zweidimensional (liegend) ausrichteten, tendierten die Fasern in ② und ③ zu einer Ausrichtung parallel zur stehenden Achse  $z$ , wobei diese Tendenz in ③ mit  $\eta_z = 0,79$  am ausgeprägtesten vorlag. Somit zeigte sich, dass es innerhalb einer Probe mit scheinbar homogener Faserverteilung und isotroper Ausrichtung der Fasern durchaus Bereiche mit „Inhomogenitäten“ geben kann, die durch die Art der Herstellung (z. B. Verdichten) und/oder der Lage (z. B. Schalungsränder) hervorgerufen werden.

### Schlussfolgerung

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihen (hier beispielhaft an vier Proben gezeigt) ermöglichten die Erlangung eines tieferen Verständnisses hinsichtlich der Aufnahmetechnik und der anzuwendenden Parameter sowie der Abhängigkeiten der zu erzielenden Bildqualität von Probengröße und Fasermenge.

Je nach „Leistung“ der verwendeten CT-Anlage kommt es ab bestimmten zu durchstrahlenden Materialstärken zu unterschiedlichen Grauwertverläufen über den Querschnitt.

Bei höheren Fasergehalten führen Strahlaufhärtung und -abschwächung zu einer schlechteren Darstellung der innen liegenden Fasern. Dieser Effekt kann beispielsweise durch die Verwendung eines Aluminiumfilters reduziert werden.

Als optimale Herangehensweise zur Ermittlung des idealen Schwellwerts bei der Binarisierung hat sich der Vergleich mit dem tatsächlichen Faserdurchmesser herausgestellt. Für einen visuellen Abgleich des Binärbilds (Ergebnisbild des segmentierten Fasersystems) mit dem Original-Grauwertbild ist die erzielte Auflösung der Aufnahme ausschlaggebend. Die Auflösung hängt im vorliegenden Fall in erster Linie von der Probengröße und der möglichen geometrischen Vergrößerung ab. Vereinfacht ausgedrückt gibt die Auflösung (in Abhängigkeit des Faserdurchmessers) die Anzahl von Pixel an, die für die Darstellung des Faserquerschnittes im zweidimensionalen Schnitt und damit zur Vermessung zur Verfügung stehen.

Grundsätzlich erlaubt die Verwendung von 8-bit-Graustufenformaten (256 Graustufen) eine Reduzierung der notwendigen Rechenleistung und somit auch eine Zeitersparnis. Jedoch ermöglichen 16-bit-Graustufenformate mit 65.536 Graustufen eine differenziertere Auswertung bezüglich des zu ermittelnden Schwellwerts.

### 5.4.3 Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen der ersten Studien zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wurden ausgewählte Probekörper mehrfach tomographiert, die Startwinkel der Aufnahmen verändert sowie Versuchskörper zusätzlich kopfüber aufgenommen und die so erzielten Ergebnisse miteinander verglichen (vgl. *Schuler u. Sych 2009* und *Schnell u. a. 2010*).

Die Messgenauigkeit bei der Ermittlung von Faserorientierung und -menge ist wie die Reproduzierbarkeit von Analyseergebnissen in erster Linie von der Qualität der CT-Aufnahmen abhängig. Je besser sich mithilfe des Schwellwertverfahrens das Fasersystem aus einem Grauwertbild segmentieren lässt, desto genauer sind die Messergebnisse.

Die Fasermenge wird anhand der Anzahl von Voxeln mit dem Wert „1“ (weiß) im betrachteten Volumen bestimmt. Ein zu niedriger Schwellwert führt zu einer Überbewertung der Faser. Ist der gewählte Schwellwert zu hoch, wird die Faser unterbewertet. Nur der zuvor beschriebene Abgleich des Segmentierungsergebnisses mit dem tatsächlichen Faserdurchmesser bzw. dem Original-Grauwertbild, ermöglicht eine genaue Analyse der Fasermenge (vgl. Abbildung 5.12).

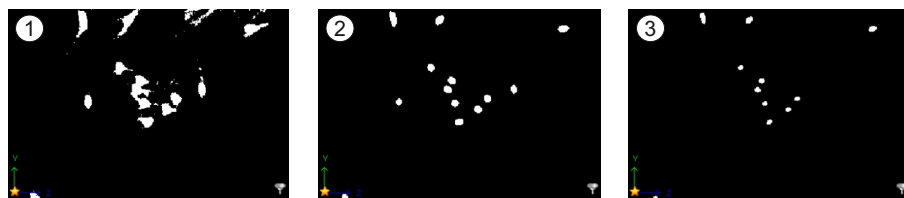


Abb. 5.12: Einfluss des Schwellwerts auf das Segmentierungsergebnis

- ① Überbewertung der Faser
- ② gutes Segmentierungsergebnis (abgeglichen mit original Grauwertbild)
- ③ Unterbewertung der Faser

Der Einfluss des Schwellwertes auf die Ergebnisse der Richtungsanalyse ist hingegen geringer. Der Faserorientierungsbeiwert beschreibt das Verhältnis der auf eine Vorzugsachse projizierten Faserlänge zu der wahren Faserlänge. Eine Unter- oder Überbewertung der Fasern wirkt sich sowohl auf die Projektionen als auch auf die Faserlänge aus; daher fällt eine Abweichung des Schwellwertes weniger ins Gewicht.

Tabelle 5.5 zeigt die Analyseergebnisse mit verändertem Schwellwert eines Ultrahochfesten Betons (UHPC) mit Mikrostahlfasern. Wie zuvor beschrieben, bewirkt eine geringfügige Veränderung des Schwellwerts innerhalb eines bestimmten Bereichs nur eine geringe Beeinflussung des resultierenden Faserorientierungsbeiwertes. Innerhalb eines realistischen Bereiches des Fasergehaltes, der durch die Art des Einbringens und Verdichtens des Stahlfaserbetons variiert, verändert sich der Faserorientierungsbeiwert nur sehr gering. Jedoch können die resultierenden Fasergehalte sowie die gemittelten Faserdurchmesser für eine Bewertung nicht herangezogen werden.

Tab. 5.5: Analyse der Faserorientierung und -menge mit verändertem Schwellwert (Mikrostahlfasern, Faserdurchmesser  $d = 175 \mu\text{m}$ , Zielfasergehalt 1,83 Vol.-%)

Schwellwert	spezifische Faserlänge	projizierte Faserlänge			mittlerer Faserdurchmesser	Faseranteil	Faserorientierungsbeiwert		
		$L_{p,q}$					$\eta_x$	$\eta_y$	$\eta_z$
		x	y	z					
		[m]	[m]	[m]					
	$L_v$				$d$	$V_v$			
	[m/m³]	[m]	[m]	[m]	[µm]	[Vol.-%]			
160	583500	30,3897	30,1183	37,3853	236	2,93	0,47	0,47	0,56
161	594233	30,3897	30,7041	37,2162	208	2,38	0,46	0,47	0,57
162	593492	30,6269	30,7454	37,4230	182	1,87	0,47	0,47	0,57
163	569688	29,7432	29,6159	36,2917	158	1,44	0,47	0,47	0,57
164	508394	26,9468	26,6684	32,9705	137	1,04	0,48	0,47	0,59
165	395610	21,7203	21,4578	26,1437	122	0,69	0,50	0,49	0,60
166	241829	13,8392	13,7719	15,9891	117	0,40	0,52	0,51	0,60



Abbildung 5.13 zeigt die Visualisierung eines Probekörpers mit einer Mikrobewehrung. Die Einzeldrähte der Drahtgittermatte weisen einen Durchmesser von 1 mm auf. Die Maschenweite beträgt 12,7 mm (vgl. *DUCON 2010*). Die Untersuchung dieser Probe mit „gerichteten Fasern“ zeigte die zu erwartenden Faserorientierungsbeiwerte für die liegenden Achsen x und y ( $\eta_x = 0,51$  und  $\eta_y = 0,52$ ).

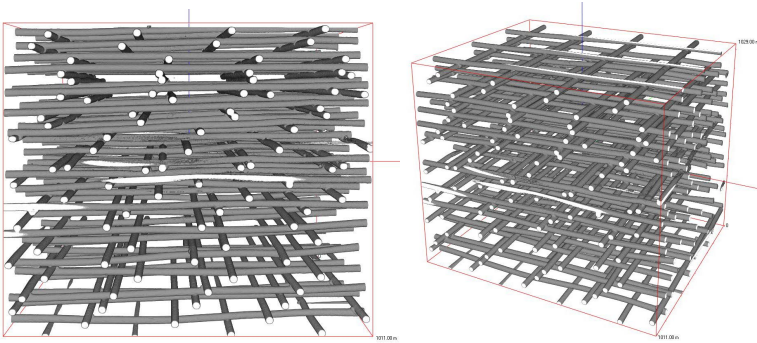


Abb. 5.13: Visualisierung des Segmentierungsergebnisses, Mikrobewehrung

Neben der zuvor beschriebenen Überprüfung der Korrektheit der Analyseergebnisse wurden im Rahmen eines vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e.V. finanzierten Forschungsprojektes (vgl. *Schuler u. Sych 2009*) vergleichende Untersuchungen mit einem induktiven Verfahren durchgeführt.

Die Auswertung der Richtungsverteilung beschränkt sich bei der ferromagnetischen Induktionsprüfung (vgl. *Wichmann u. a. 1999, Breitenbücher u. Rahm 2009*) auf eine prozentuale Angabe in die drei Hauptachsenrichtungen, wobei hier keine Aussage über die Verteilung der Fasern im betrachteten Volumen getroffen werden kann. Für die Bestimmung eines aussagekräftigen Faserorientierungsbeiwertes, bei dem der Einfluss der Faserverteilung besonders an geometrischen Zwangspunkten (Schalkanten, Einbauteile, etc.) als weiterer Parameter eingehen soll, zeigt die CT-Analyse ihre Vorteile gegenüber anderen Analysemethoden. (Hinweise zum Funktionsprinzip des induktiven Verfahrens können Abschnitt 2.2.3 entnommen werden.)

## 5.5 Zusammenfassung und beispielhafte Anwendungen des Verfahrens

Nach der in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Anpassung, Weiterentwicklung und Überprüfung des CT-Verfahrens konnte festgestellt werden, dass mit der vorgestellten Analyse des Fasersystems ein leistungsstarkes Werkzeug zur Ermittlung der Orientierung und der mengenmäßigen Verteilung von Fasern in Beton zur Verfügung steht.

Im Rahmen der im Folgenden auszugsweise genannten Projekte konnten verschiedene Anwendungsmöglichkeiten auf typische Fragestellungen des Bauingenieurwesens getestet werden.

- **Stahlfaserbeton**

Die erste Untersuchung einer größeren Probenserie wurde an Bohrkernen durchgeführt, die aus Industrieböden unterschiedlicher Fertigungshallen des Stahlfaserherstellers ArcelorMittal, Luxemburg entnommen wurden. Aufgrund der bei der Herstellung der Bodenplatten verwendeten unterschiedlichen Fasermenge und -art konnten diese Arbeiten wertvolle Information für die Weiterentwicklung der Aufnahmetechnik und der Analyse liefern, sodass bei Fragestellungen hinsichtlich der in Bauteilen vorliegenden Menge, Ausrichtung und/oder der Verteilung der Fasern gesicherte Aussagen möglich waren und sind. Beispielhaft ist hier die Untersuchung von Tunneltübbings zu nennen (vgl. *Schuler u. a. 2017*).

- **Faserverstärkter Hochleistungsbeton**

Für die im Rahmen der in *Heese 2013* durchgeführten Forschungsarbeiten zu den rheologischen Eigenschaften von faserverstärkten Feinkornbetonen konnten mithilfe der CT-Analyse die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Faserorientierung und -verteilung validiert werden.

Die Einflüsse eines hohen Bewehrungsgehaltes und der Einbringart des Betons bei der Verwendung von Kombibewehrung (Mikrofaser und große Bewehrungsdurchmesser) in UHPC auf die Faserausrichtung und -verteilung wurden in *Nezhentseva u. a. 2013* untersucht.

Die bei der Herstellung von Probekörpern aus Faserbeton (zur Ermittlung der Festbetonkennwerte) verwendete Verdichtungsenergie bzw. -frequenz hat einen erheblichen Einfluss auf die Verteilung und Orientierung der Fasern. Mithilfe der CT-Analyse wurde dieser Einfluss untersucht. Ziel war die Herstellung von Proben mit einer homogenen Faserverteilung (vgl. *Schnell u. a. 2012*).

## 6 Untersuchung rissquerender Fasern

### 6.1 Einleitung

Mit der in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellten Analyse am Fasersystem kann die Orientierung und Menge der Fasern im gesamten Volumen eines Probekörpers bestimmt werden. Eine Analyse von Teilbereichen zur Bewertung der Faserverteilung ist ebenfalls ausführbar. Die Betrachtung von einzelnen Fasern ist jedoch nur visuell möglich.

Basis für die im Folgenden vorgestellten Arbeiten bildet ein Programmmodul der Software "MAVI" (vgl. *Schladitz u. Godehardt 2016*), dass die Segmentierung von einzelnen Objekten anhand von Pixel- bzw. Voxelnachbarschaften ermöglicht. Dieses Verfahren wurde zuvor am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern lediglich zu einer Sauberkeitsanalyse bei der Herstellung von Bauteilen eingesetzt. Die Analyse erfolgte hierbei an zweidimensionalen Mikroskopaufnahmen von in Legierungen eingeschlossenen Schmutzpartikeln (vgl. *Vecchio u. a. 2010* und *Vecchio u. a. 2011*).

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Objektsegmentierung erlaubt die Betrachtung jeder einzelnen Faser als einzelnes Objekt. Des Weiteren werden mittels des Programmmoduls objektspezifische Parameter bestimmt. Mithilfe dieser Objekteigenschaften kann eine Charakterisierung von Objekten erfolgen (vgl. Abschnitt 4.3).

Für die Untersuchung von Rissbereichen bedeutet dies, die Möglichkeit z. B. Objekte (Fasern), die nicht zur aktuellen Betrachtung beitragen, entfernen zu können. Zudem bieten die objektspezifischen Parameter die Möglichkeit Informationen u. a. über Länge, Verformung und Ausrichtungswinkel jeder einzelnen Faser sammeln zu können. Dies erlaubt beispielsweise die Ermittlung eines Faserorientierungsbeiwertes, bei dem nur die kraftübertragenden Fasern berücksichtigt werden.

Als Grundlage für die Ermittlung dieser die Fasern betreffenden Objektparameter benötigt man einen dreidimensionalen Datensatz, in dem alle Fasern sowie der Riss als einzelne Objekte vorliegen.

Basis für die nachfolgend vorgestellten Arbeiten bildete ein Datensatz aus einer Aufnahmeserie von insgesamt 36 Proben. Für die Grundlagenermittlung wurde der Datensatz ausgewählt, der sowohl die höchste Fasermenge als auch die schlechteste Bildqualität aufwies. Durch dieses Vorgehen sollten alle Schwierigkeiten, die bei der Durchführung von Analysen von großen Prüfserien auftreten können, abgedeckt werden.

Im vorliegenden Fall musste die Probengröße an die verfügbare Aufnahmetechnik angepasst werden. Stehen leistungsfähigere CT-Anlagen zur Verfügung können auch größere Probekörper durchstrahlt und analysiert werden. Hierbei ist jedoch ein Ska-

lierungseffekt zu beobachten, der auch bei der Verwendung leistungsstärkerer CT-Anlagen auftritt. Die Bildqualität nimmt mit der Zunahme der zu durchstrahlenden Materialstärke ab.

Die im Folgenden erläuterten Untersuchungen wurden in drei Arbeitsschritten durchgeführt:

- Überprüfung der Anwendbarkeit des Programmmoduls „MAVIparticle“ auf den Anwendungsfall Stahlfaserbeton.
- Anpassung der für die Segmentierung von Einzelfasern notwendigen Arbeitsschritte.
- Ermittlung von faserspezifischen Parametern, wie z. B. räumliche Ausrichtung jeder einzelnen Faser und Einbindelänge der Fasern in die jeweiligen Rissflanken.

Ziel war die Bereitstellung eines Werkzeugs zur Ermittlung von für das Nachrissverhalten von Stahlfaserbeton relevanten faserspezifischen Parametern (Orientierung, Einbindelänge, etc.), die mit den bisher zur Verfügung stehenden, teilweise zerstörenden, Untersuchungsmethoden nicht ermittelt werden konnten.

## 6.2 Experimentelles

### 6.2.1 Probekörper

Die für die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten verwendeten Probekörper entstammen einer Versuchsreihe, die aus drei Serien mit je sechs Versuchsbalken bestand. Die Versuchsserien unterschieden sich lediglich in der Menge der zugegebenen Stahlfasern ( $30 \text{ kg/m}^3$ ,  $45 \text{ kg/m}^3$  und  $60 \text{ kg/m}^3$ ). Weiterführende Informationen zur verwendeten Stahlfaserbetonmischung können Anlage A entnommen werden.

Bei den durchgeführten Biegezugversuchen sollten u. a. die Rissweite sowie die Verformungen im Rissbereich über unterschiedliche Höhen des Balkenquerschnittes gemessen werden. Zur Messung der Rissweiten bzw. Verformungen ist ein Versuchsaufbau zweckmäßig, bei dem der Rissentstehungsort a priori bekannt ist. Die Anordnung einer Kerbe mit einer Tiefe von 25 mm und einer Breite von 5 mm in Balkenmitte ermöglicht die Initiierung des Risses an vorgegebener Stelle. Der grundlegende Aufbau eines 3-Punkt Biegeversuches kann Abbildung 6.1 entnommen werden.

Hinsichtlich des vorgegebenen Rissentstehungsortes und des von der Kerbe beeinflussten Rissverlaufs können die zu untersuchenden Rissbereiche jeweils in der gleichen Größe entnommen werden. Die Rissbereiche wurden in einer Breite von 100 mm entnommen. Aufgrund der maximal durchstrahlbaren Materialstärke, die durch die vorhandene bzw. verwendete Aufnahmetechnik gegeben war, mussten die entnommenen Rissbereiche in zwei Teilproben (I und II) aufgeteilt werden.

Das Heraussägen der Rissbereiche bzw. der Teilproben hat die Entstehung von Schnittflächen zur Folge, durch die Fasern zerschnitten werden können. Die Abbildung 6.2 gibt diese Schnittflächen sowie die Begrenzungsflächen der Schalung bzw. der Betonoberseite wieder. Die Schnittflächen „a1“ und „a2“ entstehen beim Heraussägen

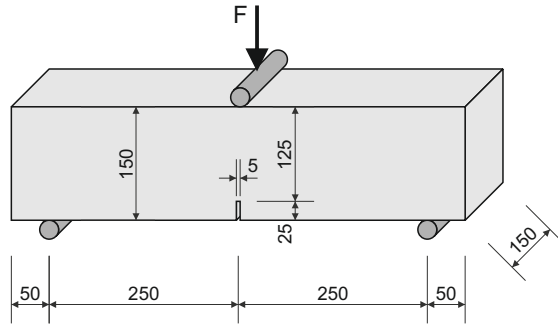


Abb. 6.1: Schematischer Aufbau eines 3-Punkt Biegezugversuches, Maße in mm

des gesamten Rissbereiches. Aus der Teilung des entnommenen Rissbereiches in die beiden Teilproben „I“ und „II“ resultiert die Schnittfläche „b“. Mit „c“ wurden die Flächen bezeichnet, die durch die Begrenzungsflächen, Schalung und Betonieroberseite entstehen. Bei diesen Flächen („c“) handelt es sich demnach um virtuelle Schnittflächen, die keine Zerteilung der Fasern zur Folge haben.

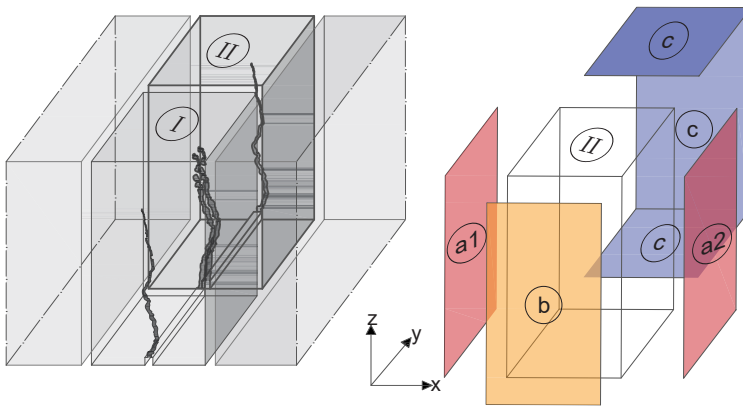


Abb. 6.2: Aus der Herstellung der Probekörpers resultierende Schnittflächen am Beispiel der Teilprobe „II“

### 6.2.2 Verwendete Stahlfasern

Die im Rahmen der Arbeiten verwendeten Stahlfasern Dramix RC 60/80 G wurden bereits für Vorversuche verwendet. Die dort durchgeführten Untersuchungen bezogen sich in erster Linie auf die Analyse der Faserorientierung am Fasersystem. Der Einfluss von Fertigungstoleranzen hinsichtlich des Durchmessers und der Länge der Fasern haben bei dieser Art der Analyse nur wenig Einfluss auf das Ergebnis (vgl. Abschnitt 5.4.3). Wird jedoch jede Faser als einzelnes Objekt betrachtet, spielen Schwankungen der Faserabmessungen bei der Charakterisierung der Objekte bzw. der Fasern

eine wichtige Rolle. Abbildung 6.3 zeigt die gemäß *DIN EN 14889-1:2006* zulässigen Maßtoleranzen.

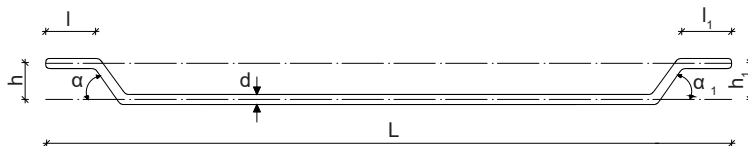


Abb. 6.3: Herstellungstoleranzen der verwendeten Stahlfaser Dramix RC 80/60 G

- $L$ : projizierte Länge 54 mm bis 66 mm (gemäß Produktbezeichnung 60 mm)
- $d$ : Durchmesser 0,68 mm bis 0,82 mm (gemäß Produktbezeichnung 0,75 mm)
- $l, l_1$ : Länge der Endaufkröpfungen nach Aufbiegung 1,5 mm bis 4,0 mm
- $h, h_1$ : Höhe der Aufkröpfung  $> 0,75$  mm
- $\alpha, \alpha_1$ : Winkel der Aufkröpfung  $> 20^\circ$

Nach Angaben des Herstellers sind Schwankungen innerhalb der in Abbildung 6.3 angegebenen Toleranzen nur zwischen unterschiedlichen Produktionslinien gegeben.

### 6.2.3 Segmentierung

#### Segmentierung des Fasersystems

Die Segmentierung des Fasersystems (Binärisierung, Bildverbesserung) wurde analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.4 durchgeführt. Jedoch führte die Anpassung der Aufnahmeparameter (vgl. Abschnitt 3.6) an eine reduzierte Aufnahmezeit zu einer im Vergleich zu prismatischen Probekörpern schlechteren Bildqualität. Aufgrund von Strahlaufhärtungen bzw. -abschwächungen kommt es bei der Binärisierung in Abhängigkeit des gewählten Schwellwertes in der Probenmitte zu einer Unterbewertung oder in den Eckbereichen (maximale Materialstärke) zu einer Überbewertung der Grauwerte bzw. der Fasern.

Zur Abschätzung der Auswirkungen einer bereichsweise vorhandenen Über- bzw. Unterbewertung des Fasersystems auf die Objektsegmentierung wurden mehrere Datensätze mit unterschiedlichen Segmentierungsergebnissen (unterschiedliche Schwellwerte) erzeugt. Die Abbildungen 6.4 und 6.5 zeigen an einem beispielhaft ausgewählten Volumenausschnitt die Auswirkung des gewählten Schwellwertes auf das Ergebnis der Binärisierung.

Das Beispiel in Abbildung 6.4 zeigt, dass der für eine ideale Binärisierung der im Eckbereich befindlichen Fasern gewählte Schwellwert bei den innen liegenden Fasern zu einer schlechteren Darstellung führt. Die starke Unterbewertung im Inneren der Probe führt u. a. zu einer Aufteilung von zusammengehörigen Faserteilen bzw. der Nichtdarstellung von Faserteilen.

Nach der Anpassung des Schwellwertes zur bestmöglichen Binärisierung der innen liegenden Fasern werden die im Eckbereich befindlichen Fasern überbewertet dargestellt (vgl. Abbildung 6.5).

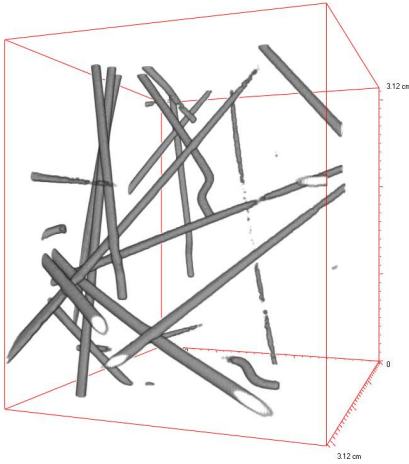


Abb. 6.4: Visualisierung des Binarisierungsergebnisses bei einer Unterbewertung der innen liegenden Fasern, beispielhafter Volumenausschnitt (3,12 cm x 3,12 cm) eines Eckbereiches

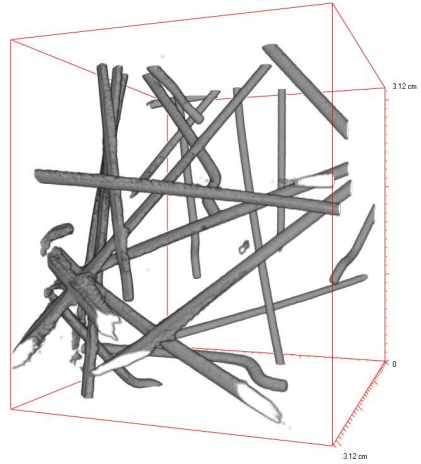


Abb. 6.5: Visualisierung des Binarisierungsergebnisses bei einer Überbewertung der im Eckbereich befindlichen Fasern, beispielhafter Volumenausschnitt (3,12 cm x 3,12 cm) eines Eckbereiches

Insgesamt wurde der Einfluss von zehn unterschiedlichen Schwellwertabstufungen auf das Binarisierungsergebnis anhand von 3D-Visualisierungen ermittelt und die fünf erfolgversprechendsten Datensätze mit dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Labeling auf die Anzahl von detektierten Objekten untersucht.

Der Vergleich der Ergebnisse des Labelings zeigte, dass eine Überbewertung der sich im Eckbereich befindlichen Fasern gegenüber einer Unterbewertung der innen liegenden Fasern einen geringeren Einfluss auf die Detektion von Objekten (Objektsegmentierung) hat. Infolgedessen wurde bei der Wahl des Schwellwerts zur Segmentierung des Fasersystems eher eine Überbewertung der äußeren Fasern hingenommen.

Ergebnis dieser vergleichenden Untersuchung war ein binarisierter Datensatz des Fasersystems mit einer minimalen Überbewertung in den Eckbereichen und nur noch wenigen störenden Objekten (Einschlüsse, Artefakte, etc.). Für die folgenden Analysen wurde nur der Bereich oberhalb der Kerbe betrachtet. Aufgrund des Sägeschnittes zur Herstellung der Kerbe wurden die dort vorhandenen Fasern zerteilt und tragen so nicht zur „Vernähung“ des Risses bei.

Nach Durchführung dieser Arbeitsschritte ist bereits eine Analyse der Faserorientierung und -menge am Fasersystem möglich (vgl. Kapitel 5).

### Segmentierung des Risses

Die Segmentierung des Risses basiert auf dem schon für das Fasersystem angewendeten Schwellwertverfahren. Entgegen dem dort verwendeten unteren Schwellwert wird bei der Binarisierung des Risses ein oberer Schwellwert in Ansatz gebracht.

Im Gegensatz zu den Fasern mit einer hohen radiografischen Dichte besitzt der gesuchte Bestandteil „Luft“ die geringste Dichte im untersuchten Probekörper. In dem zu analysierenden Datensatz befinden sich neben dem gesuchten Riss auch Luftporen und Bereiche mit lokalen „Unregelmäßigkeiten“ (lokale Grauwert-Minima) in der Beton- bzw. Zementmatrix. Der Umstand, dass all diese Bestandteile sehr ähnliche Grauwerte aufweisen, führt zu dem in Abbildung 6.8 (links) dargestellten Segmentierungsergebnis. Ein Freistellen des Risses ist nicht ohne Weiteres möglich.

In einem vorgelagerten Arbeitsschritt wurde versucht den sich über den Querschnitt verändernden Grauwertverlauf (vgl. Abbildung 6.6) auszugleichen bzw. möglichst gut anzupassen.

Einem Zylinder, der in der Original-Aufnahme den gesamten Probekörper umhüllt, wird der Wert „1“ (weiß) zugewiesen. Nun kann mithilfe der euklidischen Distanztransformation für jedes Voxel des Vordergrundes („weiß“) die Distanz zum jeweiligen Grauwert bestimmt werden (Distanzbild). Diese Daten werden invertiert und vom Original-Bild subtrahiert. Das Ergebnis dieser Anpassung kann Abbildung 6.7 entnommen werden.

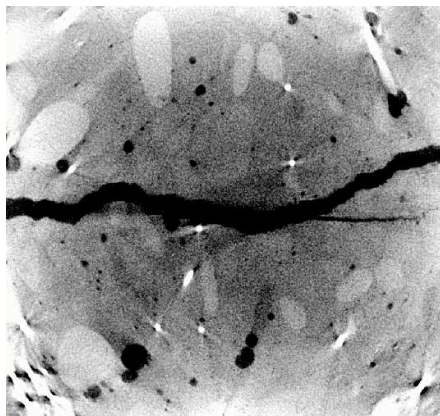


Abb. 6.6: Darstellung des ungleichmäßigen Grauwertverlaufes am Beispiel eines Schnittbildes, 16-Bit Darstellung

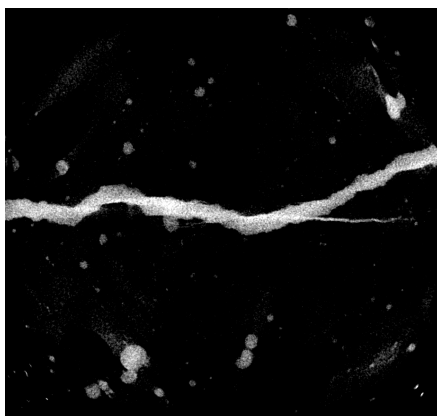


Abb. 6.7: Ergebnis der Grauwertanpassung am Beispiel eines Schnittbildes, 12-Bit Darstellung

Die Anwendung des Filters „fill holes“ (vgl. Abschnitt 4.2) ermöglicht die Anpassung der regionalen Minima an umliegende Grauwerte. Wie Abbildung 6.8 (rechts) zeigt, werden eine Vielzahl von nicht zum Riss gehörende Grauwerte an den Hintergrund angepasst und so eine für die Darstellung des Risses bessere Segmentierung ermöglicht.

Nach erfolgter Binarisierung des Risses konnten mittels Objektfilter weitere kleine störende Einschlüsse entfernt werden.

Aufgrund der „schlechten“ Bildqualität der CT-Aufnahme konnten bei der Binarisierung entstandene Überbewertungen, speziell in Randbereichen (entlang von Fasern), nicht verhindert werden. Bei den im Folgenden erläuterten Untersuchungen zeigte sich dieser Umstand jedoch als nicht hinderlich.



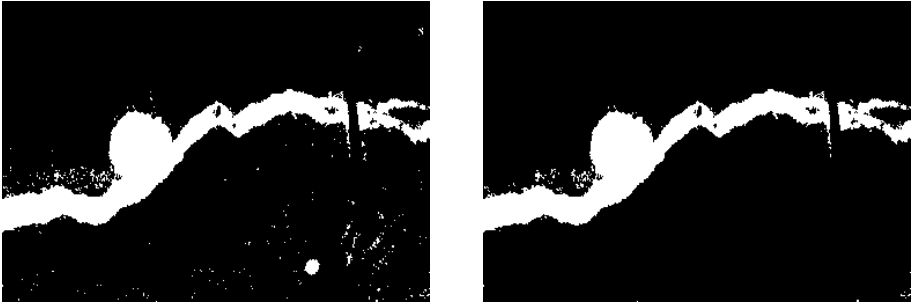


Abb. 6.8: Segmentierungsergebnis vor und nach der Anwendung des Filters „fill holes“ zur Reduzierung von lokalen Minima; Beispielhafte Darstellung an einem binarisierten Bildausschnitt

links: Segmentierungsergebnis ohne Anwendung des Filters  
rechts: Segmentierungsergebnis nach Anwendung des Filters

### 6.2.4 Labeling

Als Basis für die Segmentierung einzelner Objekte diene der im vorhergehenden Kapitel beschriebene binarisierte Datensatz. Das vorliegende dreidimensionale Bild des Fasersystems besteht demnach nur noch aus zwei Werten. Der Wert „1“ (weiß) wurde dem Fasersystem zugewiesen. Der Wert „0“ (schwarz) wurde den restlichen Bestandteilen (Zementmatrix, Gesteinskörnung, etc.) zugeordnet.

Ziel des sogenannten „Labeling“ ist die Segmentierung einzelner Objekte mithilfe von Pixel- bzw. Voxelnachbarschaften (vgl. Abbildung 6.9). Vereinfacht ausgedrückt sucht der Algorithmus in einer vorgegebenen Rastergröße im Umkreis eines Voxels nach Voxeln mit gleichen Eigenschaften (Wert „1“).

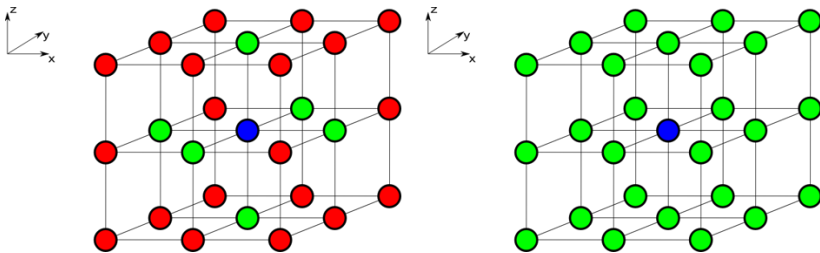


Abb. 6.9: Nachbarschaftssysteme in 3D; direkte Nachbarn (grün) des zentralen Pixels (blau)

links: 6-Nachbarschaftssystem  
rechts: 26-Nachbarschaftssystem

Diese „zusammengehörenden“ Voxel werden zu Objekten zusammengefasst und mit einem Label (Objektnummer), das eine eindeutige Zuordnung erlaubt, versehen.

Befinden sich Voxel verschiedener gesuchter Objekte innerhalb dieses Suchrasters, werden diese als Objekt (Objektschar) zusammengefasst.

Im vorliegenden Fall kann eine solche Objektschar aus einem Konglomerat von mehreren Fasern oder auch der Verbindung von Fasern und Einschlüssen bestehen. Begrün-

det wird diese über sich berührende Fasern oder Fasern, die sehr nah beieinander liegen. Aus der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Überbewertung in Eckbereichen kommt es hier vermehrt zu sich berührenden Objekten.

Je nach Wahl der Nachbarschaftsbeziehungen (vgl. Abbildung 6.9) verändert sich die Anzahl der detektierten Objekte. Zur Untersuchung des Einflusses der unterschiedlichen Nachbarschaftsbeziehungen auf das Ergebnis der Objektsegmentierung wurde sowohl die feinste Abstufung (26er-Nachbarschaft) als auch die gröbste Einstellung (6er-Nachbarschaft) angewendet.

Vorversuche an mehreren Datensätzen zur Untersuchung des Einflusses der gewählten Nachbarschaftsbeziehung auf das Ergebnis der Objektsegmentierung haben gezeigt, dass die Verwendung der 26er-Nachbarschaft grundsätzlich zu einer geringeren Anzahl an Objekten führt. Aufgrund des weiterreichenden Suchrasters für Voxel mit gleichen Eigenschaften werden mehr Objekte zusammengefasst.

Bei dem für die Vorversuche verwendeten Datensatz ergaben sich für die Anwendung des 26er-Rasters 194 Objekte und für das 6er-Raster 203 Objekte. Mithilfe einer visuellen Überprüfung der Segmentierungsergebnisse an Schnittbildern konnte festgestellt werden, dass die erhöhte Anzahl an Objekten durch die Reduzierung der Objektscharen zustande kam. Ein negativer Einfluss auf eventuell vorhandene unterbewertete Bereiche (Fasern aus Teilstücken) konnte nicht festgestellt werden.

Aufgrund der „besseren“ Segmentierungsergebnisse wurde für die weitere Bearbeitung die 6er-Nachbarschaft gewählt.

Ergebnis des durchgeführten Labelings war ein Datensatz mit insgesamt 203 Objekten. Bei diesen Objekten kann es sich jeweils um eine Einzelfaser, einen Einschluss oder eine Objektschar handeln.

## 6.3 Objektsegmentierung von Einzelfasern

### 6.3.1 Zielsetzung und Vorgehen

Der Hauptanwendungsbereich bzw. der Fokus der Entwicklungsarbeit des verwendeten Programmmoduls „MAVIparticle“ liegt in der Analyse von Schmutzpartikeln in Verbundwerkstoffen. In diesem Fall befinden sich die „gesuchten“ Objekte relativ weit voneinander entfernt und berühren sich weitestgehend nicht. Bei dem Anwendungsfall Stahlfaserbeton werden aufgrund sich berührender Voxel Ansammlungen von Stahlfasern und/oder Einschlüssen als einzelnes Objekt erkannt. Diese Konglomerate aus mehreren gesuchten Objekten werden im Folgenden als Objektschar bezeichnet. Somit liegen nach der erstmaligen Objektsegmentierung drei Objektklassen vor; Einzelfasern, Objektscharen und eventuell vorhandene störende Einschlüsse (Faserstücke, Luftporen, etc.). Die Betrachtung des Risses bleibt zunächst außen vor.

Für die angestrebte Ermittlung von faserspezifischen Parametern wird ein Datensatz benötigt, in dem alle Fasern als einzelnes Objekt vorliegen. Hierzu müssen zunächst alle Objektscharen in Einzelfasern zerlegt und störende Einschlüsse entfernt werden.

Für eine Bearbeitung bzw. das Entfernen einer dieser Teilmengen müssen zunächst die zur jeweiligen Objektklasse gehörenden Objekte ermittelt werden. Aufgrund der sehr aufwändigen visuellen bzw. manuellen Überprüfung an 3D-Visualisierungen der einzelnen Objekte, wurde diesbezüglich ein auf Objektparametern basierender Vorfilter entwickelt. Dieser erlaubt eine deutliche Reduzierung der manuell zu charakterisierenden Objekte.

Zur Validierung der Ergebnisse, der mittels des Vorfilters durchgeführten Objektklassifizierung und der weiteren Bearbeitung der Ergebnisbilder, wurden alle im ersten Schritt „gelabelten“ Objekte mithilfe der Analysesoftware separiert und anhand der 3D-Visualisierungen charakterisiert.

Die Objektscharen müssen in mehreren Arbeitsschritten unter Einsatz von Bildbearbeitungsfiltern in einzelne Segmente zerlegt werden. Diese Segmente müssen dann nach ihrer Zugehörigkeit zu den gesuchten Objektklassen (Fasern und Einschlüsse) zusammengeführt werden.

Nach der Zusammenführung aller Objekte in einen Datensatz liegen alle im Probekörper befindlichen Fasern und Einschlüsse als einzelne Objekte vor.

Der Abbildung 6.10 können die im Folgenden erläuterten und aufeinander aufbauenden Arbeitsschritte der Objektsegmentierung entnommen werden.

### 6.3.2 Visuelle Überprüfung der gelabelten Objekte

#### 6.3.2.1 Allgemeines

Zur Schaffung einer Datenbasis, die es erlaubt eine Beurteilung der in Abschnitt 6.3.4 durchgeführten Klassifizierung von Objekten bzw. der Zuordnung der gelabelten Objekte zu einer der drei Objektklassen (Einzelfasern, Objektscharen, Einschlüsse) vorzunehmen, wurden zunächst alle 203 Objekte mithilfe der Analysesoftware separiert und 3D-Visualisierungen erstellt.

Mithilfe einer visuellen Überprüfung der dreidimensionalen Bilder wurden die einzelnen Objekte der jeweiligen Objektklasse zugeordnet. Zudem konnten mittels der durch die visuelle Prüfung gesammelten Daten die Ergebnisse der Objektsegmentierung validiert werden.

Nach erfolgter Zuordnung zu einer Objektklasse wurden die im Folgenden beschriebenen Merkmale dokumentiert.

#### 6.3.2.2 Einzelfasern

Die visuell ermittelten Fasern wurden zunächst hinsichtlich ihrer Lage, Größe und Form unterschieden.

Bei Betrachtung der Einzelfasern konnten sowohl Fasern festgestellt werden, die vollständig innerhalb des untersuchten Volumens lagen (vgl. Abbildung 6.11, ①), als auch Fasern, die die Seitenflächen des Probekörpers durchdrangen (vgl. Abbildung

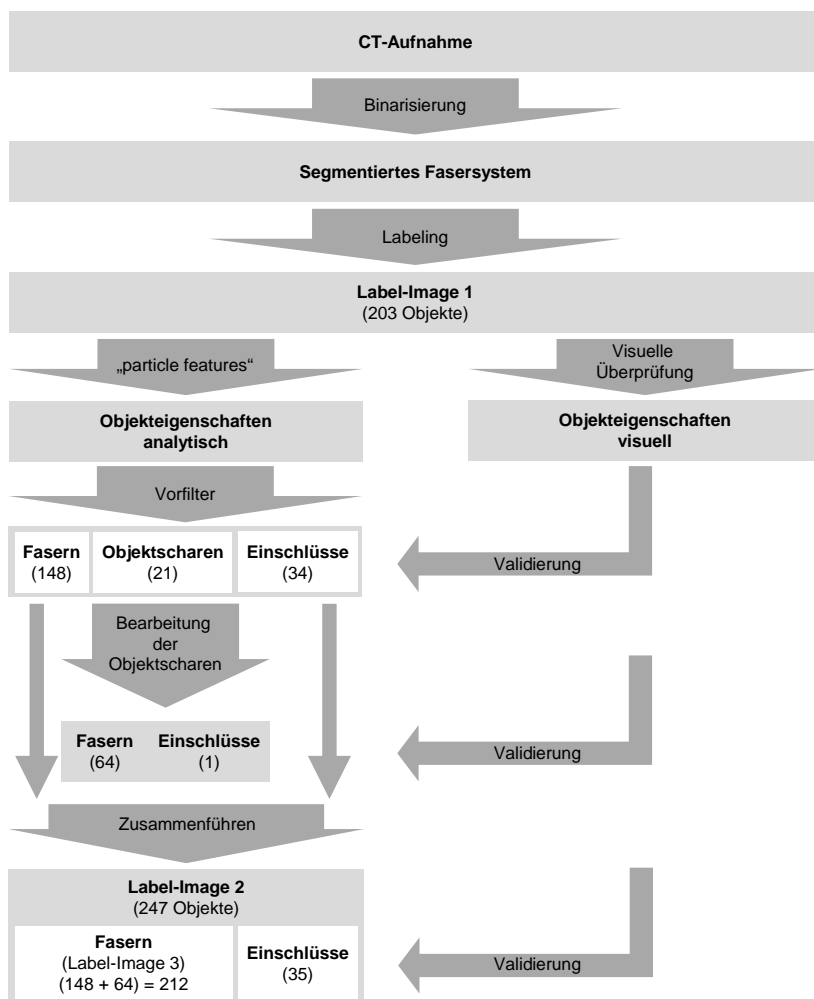


Abb. 6.10: Schematische Darstellung der Objektsegmentierung

6.11, ②). Einen Sonderfall bildeten Fasern, die zugleich zwei Begrenzungsflächen penetrierten (vgl. Abbildung 6.11, ③).

Bei diesen Begrenzungsflächen kann es sich um Schnittflächen handeln, die beim Heraussägen der Rissbereiche bzw. der Teilprobe entstehen. Die Schalungsunterseite bzw. die Betonieroberfläche wird nur berührt, aber nicht durchdrungen.

Durchdringt eine Faser eine Schnittfläche nur sehr kurz, kommt es zur Entstehung von Faserteilstücken, die bei einer reinen Größenbetrachtung als unbedeutende Einschlüsse ausgefiltert werden würden.

Aufgrund des später möglichen Zusammensetzens der beiden Teilproben I und II sind besonders die Fasern von Interesse, die den Schnittbereich b (vgl. Abbildung 6.2) zwischen den beiden Teilstücken kreuzen.

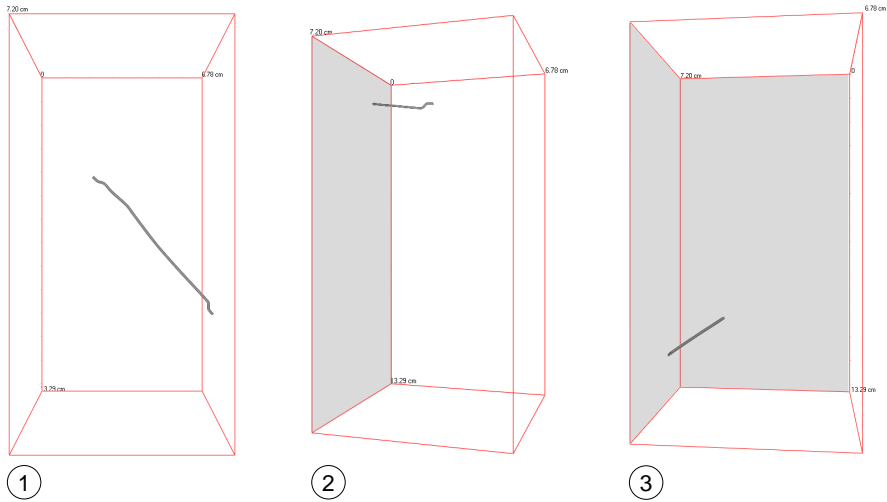


Abb. 6.11: Beispielhafte Darstellung von segmentierten Einzelfasern anhand von 3D-Visualisierungen

- ① innerhalb des Probekörpers liegende gerade Faser (Label 92)
- ② Faser (Label 39) durchdringt eine Seitenfläche (grau hinterlegt) des Probekörpers
- ③ Faser (Label 160) durchdringt zwei Seitenflächen (grau hinterlegt)

Angesichts der bei der Betrachtung der Visualisierungen festgestellten Verformungen der Fasern, wurde auch hinsichtlich der Form der jeweiligen Einzelfaser eine Unterscheidung vorgenommen. Abbildung 6.12 zeigt eine durch den Misch- und/oder Betniervorgang stark gebogene Faser. Fasern, die sich im Bereich des bei der Prüfung der Nachrissbiegezugfestigkeit entstehenden Risses befinden, erfahren ebenfalls eine Verformung (vgl. Abbildung 6.13).

Die Ergebnisse der visuellen Überprüfung der Einzelfasern wurden in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Eine detaillierte Übersicht der als Faser identifizierten Objekte und deren Merkmale können der Anlage B.1.1 entnommen werden.

Tab. 6.1: Zusammenfassung der visuellen Untersuchung der Objekte, erkannte Fasern

Anzahl		Form		Lage			
gesamt	gerade	gebogen	„kleine“ Faserstücke	frei liegend	eine Schnittfläche	zwei Schnittflächen	Schnittfläche „b“
148	108	35	5	13	114	19	21

### 6.3.2.3 Einschlüsse

Die mittels Betrachtung der Visualisierungen identifizierten Einschlüsse (Faserstücke, Poren, Artefakte) wurden hinsichtlich ihrer Größe, Form und Lage unterschieden.

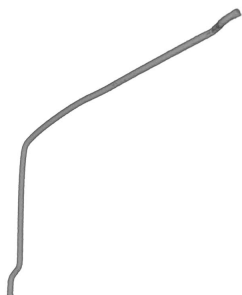


Abb. 6.12: Visualisierung einer beim Mischen und/oder Einbringen des Betons stark verformten Faser (Objekt 145)

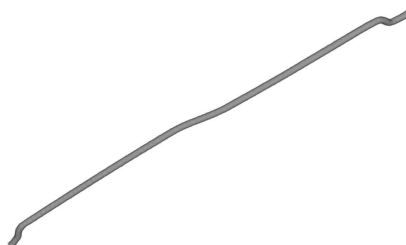


Abb. 6.13: Visualisierung einer Faser mit einem verformten Teilstück im Bereich des Risses (Objekt 70)

Analog zu der Beschreibung der Einzelfasern spielt bei Einschlüssen die Lage im Probekörper im Hinblick auf mögliche Berührungs- bzw. Durchdringungspunkte mit den Schnittflächen eine Rolle. Auf diese Weise sollten bei der späteren bildanalytischen Charakterisierung Verwechslungen mit kurzen Faserstücken ausgeschlossen werden.

Bezüglich der Form wurde zwischen „wolkig“ und „zylindrisch“ unterschieden. Zylindrische Formen ergeben sich aus den zuvor beschriebenen „abgeschnittenen“ Faserstücken. Wolkige Formen entstehen durch Artefakte aus der Aufnahmetechnik oder stark überbewerteten Bereichen in den Probekörperecken.

Die Ergebnisse der visuellen Überprüfung der Einschlüsse wurden in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Eine detaillierte Übersicht der als Einschlüsse identifizierten Objekte und deren Merkmale können der Anlage B.1.2 entnommen werden.

Tab. 6.2: Zusammenfassung der visuellen Untersuchung der Objekte, erkannte Einschlüsse

Anzahl	Form			Lage		
	gesamt	wolkig	zylindrisch	frei liegend	eine Schnittfläche	zwei Schnittflächen
	34	7	27	10	21	3

#### 6.3.2.4 Objektschar

Bei einer Objektschar kann es sich um ein Konglomerat aus unterschiedlichen Objekten handeln. Zwei Möglichkeiten sind grundsätzlich gegeben; sich berührende Einzelfasern oder Fasern, die eine Verbindung mit Einschlüssen eingegangen sind. Aufgrund der unterschiedlichen möglichen Zusammensetzungen einer Objektschar wurde zunächst eine Übersicht über die Anzahl und Art der Bestandteile erstellt.

Für eine spätere Bewertung der analysierten Objekteigenschaften sind neben der Zusammensetzung einer Objektschar die Form und die Abmessung von entscheidender

Bedeutung. Unterschieden wurde zwischen einer eher „ebenen“ und einer eher „räumlichen“ Form der Objekte.

Die Abbildung 6.14 zeigt eine Objektschar, die sich aus insgesamt neun Fasern zusammensetzt, und teilweise die Schnittflächen durchdringen. Diese Objektschar weist eine ebene Form auf, d. h. die sich berührenden Fasern sind eher zweidimensional zueinander ausgerichtet. Im Gegensatz hierzu zeigt die Abbildung 6.15 ein Konglomerat aus drei sich kreuzenden Fasern, das eine räumliche Form bzw. eine dreidimensionale Ausrichtung der sich berührenden Fasern aufweist.

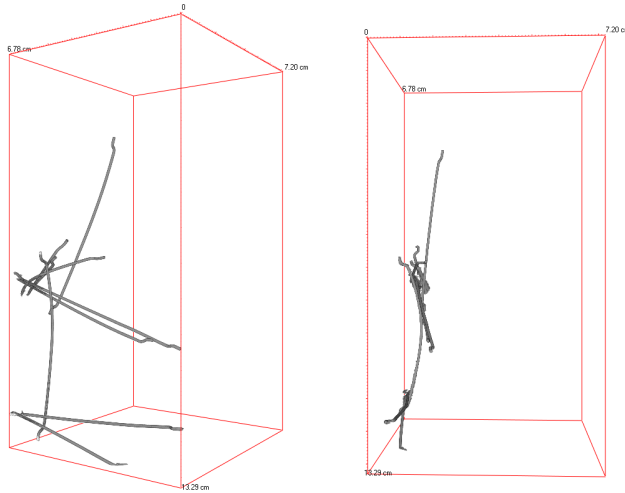


Abb. 6.14: Beispielhafte Visualisierungen einer Objektschar (Label 68) aus zwei Perspektiven, die sich aus insgesamt neun Fasern zusammensetzt. Mehrere Fasern durchdringen eine Seitenfläche. Die Visualisierungen zeigen eine eher zweidimensionale Form der Objektschar.

Die Ergebnisse der visuellen Überprüfung der Objektscharen wurden in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Eine detaillierte Übersicht der als Objektschar identifizierte Objekte und deren Merkmale können der Anlage B.1.3 entnommen werden.

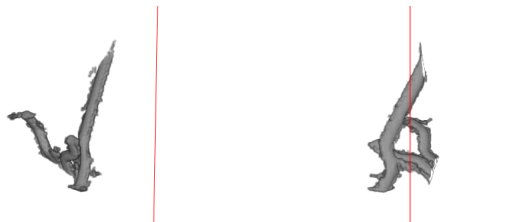


Abb. 6.15: Beispielhafte Visualisierungen einer Objektschar (Label 89) aus zwei Perspektiven, die sich aus insgesamt drei Fasern zusammensetzt. Zwei Fasern durchdringen eine Seitenfläche. Die Visualisierungen zeigen eine eher dreidimensionale Form der Objektschar. Aufgrund der Lage in einem Eckbereich sind die einzelnen Fasern überbewertet.

Tab. 6.3: Zusammenfassung der visuellen Untersuchung der Objekte, erkannte Objektschare

Anzahl gesamt	Form		Gesamtanzahl der Objekte	
	räumlich	eben	Einschlüsse	Fasern
21	2	19	1	64

### 6.3.3 Ermittlung von Objekteigenschaften („particle features“)

Zur Klassifizierung der durch das Labeling erzeugten Objekte, d. h. der Zuordnung der einzelnen Objekte zu der jeweiligen Objektklasse (Einzelfaser, Einschluss, Objektschar) müssen diese Objekte charakterisiert werden. Hierzu wurde zunächst die im Programmmodul „MAVparticle“ implementierte Partikelanalyse durchgeführt. Diese Analyse liefert eine Vielzahl von Eigenschaften („particle features“), die für die Beschreibung des jeweiligen Objektes benötigt werden.

Die Ergebnisse der Analyse der einzelnen Objekte können der Anlage B.2 entnommen werden. Die Angaben der Parameter beschränken sich auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Eigenschaften zur Charakterisierung der Objekte. Darüber hinaus wurde eine Visualisierung sowie eine Beschreibung der Lage und der Form des jeweiligen Objektes der Übersicht beigelegt.

Im Folgenden wird näher auf die für die Klassifizierung der Objekte verwendeten Parameter eingegangen. Diese in den Grundlagen (vgl. Abschnitt 4.3) beschriebenen Objektparameter („particle features“) wurden in den Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM (vgl. *Vecchio u. a. 2011* und *Vecchio u. a. 2010*) zur Beschreibung von Schmutzpartikeln in Legierungen angewandt. Bei diesen Partikeln handelt es sich meist um Objekte ähnlich einer Gesteinskörnung mit gedrunghenen oder plattigen Formen.

Diese Parameter finden zum einen Anwendung bei der beschriebenen Charakterisierung von Fasern und der Ermittlung von für die im Nachrissbereich von Stahlfaserbeton wichtigen Eigenschaften. Zum anderen werden diese Parameter im Folgenden für die Filterung der drei Objektklassen verwendet (vgl. Abschnitt 6.3.4). Die verwendeten Parameter wurden bereits in Abschnitt 4.3 allgemein beschrieben. Ferner werden mögliche Auswirkungen der unterschiedlichen Objekte (Einzelfasern, Objektscharen, Einschlüsse) auf die jeweiligen Parameter vorgestellt.

#### Volumen

Das „volume“ eines Objektes wird über die Anzahl der zum jeweiligen Objekt gehörenden Voxel und der zugehörigen Voxelgröße bestimmt. Im vorliegenden Fall beträgt die Kantenlänge eines Voxels  $77,9753 \mu\text{m}$ . Diese Größe gibt zugleich die Auflösung der CT-Aufnahme wieder.

Aufgrund von Fertigungstoleranzen der Fasern (vgl. Abschnitt 6.2.2) kann das Volumen einer voll dargestellten Faser im Extremfall zwischen  $19,611 \text{ mm}^3$  und  $34,855 \text{ mm}^3$  liegen. Der Vergleich der Volumina der im untersuchten Probekörper liegenden voll dargestellten Fasern zeigte keine solche große Streuung. Insgesamt wurden 13 Fasern analysiert. Das minimale bzw. maximale Volumen betrug  $26,368 \text{ mm}^3$  bzw.  $32,009 \text{ mm}^3$ . Im Mittel wurde ein Volumen von  $29,694 \text{ mm}^3$  berechnet (vgl. Tabelle 6.4). Aufgrund



von Diskretisierungsproblemen bei unterschiedlichen Ausrichtungen von Objekten zum Raumgitter, kann es zu Abweichungen hinsichtlich der Binarisierung und so zu Abweichungen bei der Bestimmung des Volumens kommen. Dies kann bei gebogenen Fasern beobachtet werden (vgl. Fasern mit „gebogener“ Form, Tabelle 6.4). Abweichungen können sich zudem aus der bereits erläuterten Über- bzw. Untersegmentierung z. B. in den Eckbereichen begründen.

Tab. 6.4: Übersicht aller im untersuchten Probekörper vollständig dargestellten Fasern mit Angabe der mittels Partikelanalyse ermittelten Parametern, Sortierung nach Form

Form	Objekt	volumen	elongation	feret diameter	local thickness	bounding box		
		[mm <sup>3</sup> ]	[μm]	[μm]	[μm]	l [μm]	w [μm]	t [μm]
gerade	84	30,364	67.152,7	64.408,7	779,8	64.384,6	5.644,8	1.040,6
	113	29,035	66.664,9	64.817,1	779,8	64.817,4	4.191,3	2.130,3
	117	31,665	67.376,4	64.441,0	764,0	64.438,6	4.801,8	1.611,9
	123	29,723	67.175,0	64.526,1	779,8	64.524,5	3.405,2	1.578,1
	132	32,009	67.097,4	65.047,2	795,2	65.043,0	2.722,0	2.515,7
leicht gebogen	34	30,451	67.819,2	63.851,1	764,0	63.851,1	7.304,1	2.041,7
	70	30,771	68.582,4	65.112,5	779,8	65.140,9	4.024,5	2.007,4
	87	30,957	67.915,6	65.062,3	779,8	65.062,3	4.109,5	1.412,6
	92	30,489	67.629,7	65.270,9	779,8	65.270,9	3.459,5	1.404,1
gebogen	145	28,375	67.434,3	53.608,8	764,0	53.608,0	18.343,7	2.628,5
	148	27,431	67.335,3	59.289,2	795,2	59.260,7	11.380,9	1.797,8
	153	28,380	69.536,4	61.238,4	764,0	61.238,4	11.962,9	2.692,5
	159	26,368	68.080,5	58.206,7	764,0	58.206,7	14.681,1	1.367,0
	Min	26,368	66.664,9	53.608,8	764,0	53.608,0	2.722,0	1.040,6
	Max	32,009	69.536,4	65.270,9	795,2	65.270,9	18.343,7	2.692,5
	Mittel	29,694	67.676,9	62.683,1	776,1	62.680,5	7.387,0	1.863,7

### Bounding Box

Die „bounding box“ beschreibt einen das Objekt umschließenden Quader mit minimalem Volumen. Die Kantenlängen des Quaders werden in absteigender Reihenfolge der Größe nach in Länge  $l$ , Breite  $w$  und Dicke  $t$  angegeben.

Bei einer ideal geraden Faser (vgl. Abbildung 6.16, ①) entsprechen die Kantenlängen der bounding box ( $l$ ,  $w$  und  $t$ ) näherungsweise den projizierten Abmessungen der Fasern (vgl. Fasern mit „gerader“ Form, Tabelle 6.4).

Weicht die Form der Faser stark vom Ideal ab (vgl. Abbildung 6.16, ②), kann über die Länge  $l$  der bounding box die Länge der Faser nicht mehr abgebildet werden. Infolge einer eventuell beim Biegen entstandenen Verdrehung der Faser können mithilfe der beiden Werte Breite  $w$  und Dicke  $t$  die Abmessungen der Faser ebenfalls nicht mehr wiedergegeben werden (vgl. Fasern mit „gebogener“ Form, Tabelle 6.4).

Abbildung 6.16, ③ zeigt eine bounding box, die eine Objektschar umspannt. Diese Objektschar setzt sich aus sechs Fasern zusammen, von denen zwei Fasern eine Schnittfläche des Probekörpers durchdringen. D.h. es sind nur Teilstücke der Fasern

im Probekörper vorhanden. Auffällig in diesem Beispiel ist die Tatsache, dass bei einer ebenen Objektschar (eher zweidimensionale Ausrichtung der Fasern) sowohl die Länge  $l$  als auch die Dicke  $t$  den Abmessungen einer einzelnen Faser umschließenden bounding box entsprechen können.

Die Fertigungstoleranzen der Fasern spielen nur bei der Betrachtung einer optimal geraden Faser eine Rolle. Eine solche Faser konnte in dem untersuchten Probekörper nur einmal lokalisiert werden (vgl. Objekt 123, Tabelle 6.4 sowie Abbildung 6.16, ①).

Die zuvor erwähnten Diskretisierungsprobleme wirken sich auf die Abmessungen der bounding box nicht aus.

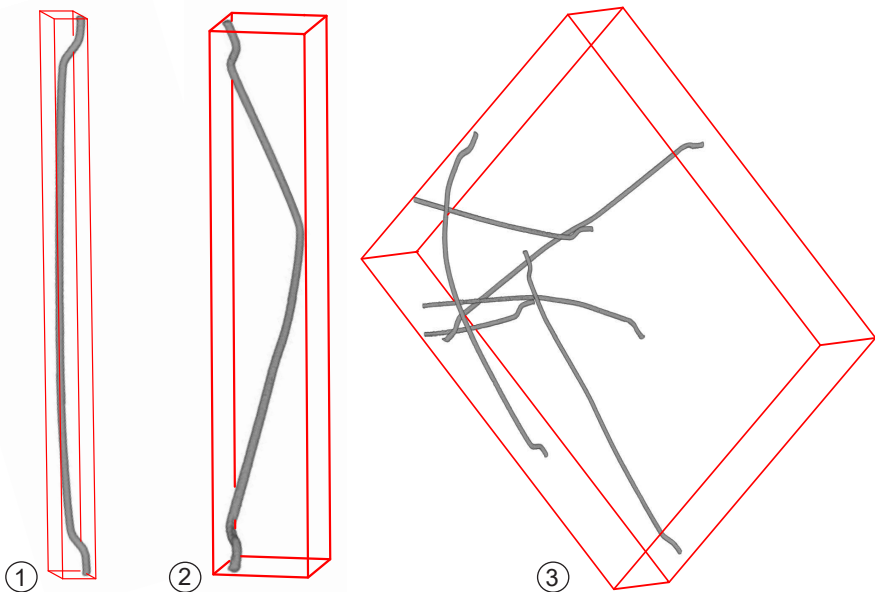


Abb. 6.16: Darstellung einer bounding box (unmaßstäbliche Darstellung der Fasern)

- ① Gerade Faser (Label 123)
- ② Gebogene Faser; leicht tordiert (Label 153)
- ③ Objektschar; bestehen aus sechs Fasern (Label 26)

### Elongation

Der Wert „elongation“ beschreibt die kürzeste Distanz der am weitesten entfernten Punkte innerhalb des Objektes (vgl. Abschnitt 4.3). Bei einer vollständig dargestellten Faser (vgl. Abbildung 6.17, ① und ②) entspricht dies, unabhängig von einer etwaigen Verformung, der „wahren“ Faserlänge. Hinsichtlich der Fertigungstoleranzen der Faser beeinflussen besonders die Einzellängen (Aufkröpfungen und Mittelstück) sowie der Winkel der Aufkröpfungen die tatsächliche Länge der Faser. Gemäß den in Abbildung 6.3 genannten Toleranzen ergeben sich mögliche Faserlängen, die in einem Bereich zwischen 58 mm und 72 mm liegen. Aufgrund der variablen Parameter  $\alpha$  und  $h$  (vgl. Abschnitt 6.2.2) ist eine genaue Bestimmung nicht möglich.

Die in Abbildung 6.17, ③ gezeigte Objektschar besteht aus sechs Einzelfasern, die sich an vier Stellen berühren (Pfeilmarkierungen). Der Algorithmus sucht auch hier

nach dem kürzesten möglichen Weg durch das gesamte Objekt. So wurde in diesem Beispiel eine elongation-Länge ermittelt, die ungefähr einer zweifachen Faserlänge entspricht.

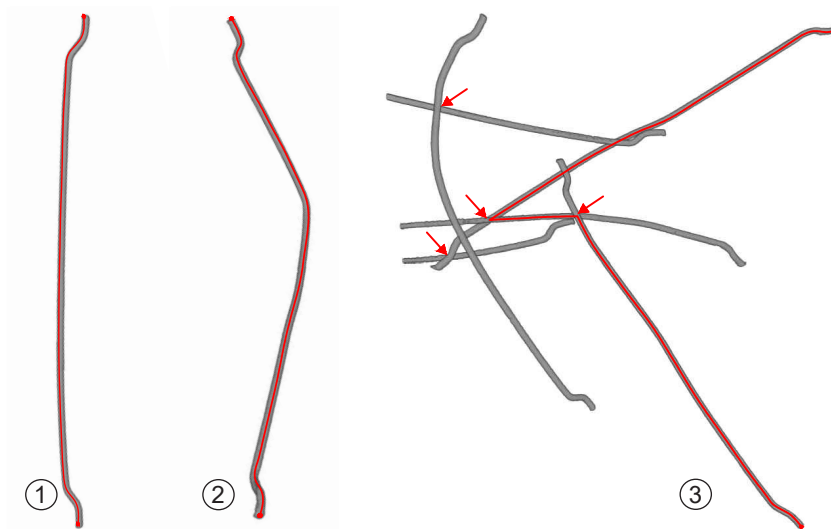


Abb. 6.17: Darstellung der elongation-Länge (unmaßstäbliche Darstellung der Fasern)

- ① gerade Faser (Label 123)
- ② gebogene Faser; leicht tordiert (Label 153)
- ③ Objektschar; bestehend aus sechs Fasern, die sich an vier Stellen berühren (vgl. Pfeilmarkierungen) (Label 26)

### Maximum Feret Diameter

Der „maximum feret diameter“ gibt den Abstand zwischen den zwei am weitesten voneinander entfernten Punkten eines Objektes wieder (vgl. Abbildung 6.18). Dies entspricht dem Durchmesser eines Kreises, dessen Endpunkte den äußersten Voxeln des Objektes entsprechen.

Analog zu der Länge  $l$  der bounding box gibt der maximum feret diameter die projizierte Faserlänge  $L$  einer ideal geraden Faser wieder. Bei Abweichungen von der ideal geraden Form kann die Länge der Fasern nicht mehr abgebildet werden.

### Maximum Local Thickness

Die „maximum local thickness“ beschreibt den Durchmesser einer Kugel, die mit maximaler Größe in dem betrachteten Objekt Platz findet. Bei einer gleichmäßig dargestellten Faser bzw. einer Objektschar, die sich aus solchen Fasern zusammensetzt, entspricht dies dem Durchmesser einer Faser (vgl. Abbildung 6.19). Wolkenförmige Einschlüsse, die aus Artefaktbildungen oder Ähnlichem resultieren, besitzen meist deutlich kleinere innere Durchmesser.

Die möglichen Fertigungstoleranzen für den Durchmesser einer Faser werden vom Hersteller mit 0,68 mm bis 0,82 mm angegeben (vgl. Abschnitt 6.2.2). Die Ergebnisse der Partikelanalyse zeigen bei Fasern und Objektscharen eine geringe Streuung. Die ermittelten Durchmesser liegen zwischen 0,74 mm und 0,80 mm und entsprechen

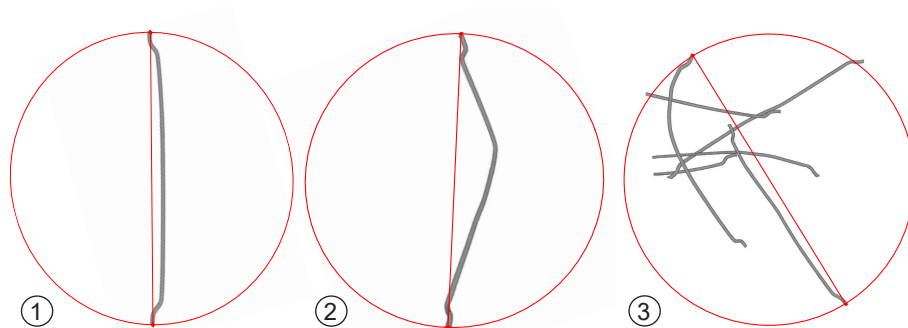


Abb. 6.18: Darstellung des maximum feret diameter (unmaßstäbliche Darstellung der Fasern)

- ① Gerade Faser (Label 123)
- ② Gebogene Faser; leicht tordiert (Label 153)
- ③ Objektschar; bestehend aus sechs Fasern (Label 26)

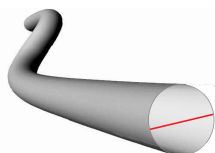


Abb. 6.19: Darstellung der „maximum local thickness“ am Beispiel einer einzelnen geraden Faser (Schnittfläche)

unter Beachtung einer geringen Über- oder Untersegmentierung dem angenommenen Durchmesser von 0,75 mm.

### Anmerkungen zu den Auswirkungen der Fertigungstoleranzen

Bei der hier vorliegenden Analyse wurde sowohl hinsichtlich der Fertigungstoleranzen als auch etwaiger Abweichungen aus der Segmentierung (Über- und Unterbewertung) nur ein geringer Einfluss auf die ermittelten Parameter festgestellt.

Jedoch soll das beschriebene Verfahren die Analyse größerer Versuchsserien erlauben. Infolgedessen müssen die vom Hersteller angegebenen möglichen Toleranzen bei der Entwicklung des Vorfilters und der Charakterisierung der Fasern berücksichtigt werden, sodass die Analyseparameter unter Beibehaltung eines Fasertyps für unterschiedliche Lieferchargen unverändert bleiben können.

### 6.3.4 Vorfilter zur Detektion von Einzelfasern, Einschlüssen und Objektscharen

Ziel war die Entwicklung eines Filters zur Detektion und Separierung der drei Objektklassen Faser, Objektschar und Einschluss unter Verwendung der in Abschnitt 6.3.3 erläuterten Objekteigenschaften („particle features“).

Zunächst wurden aus anderen Arbeiten bekannte Herangehensweisen wie der Einsatz des Zingg-Diagramms oder der Shape- und/oder Formfaktoren zur Charakteri-

sierung von Objekten (Schotter oder Schmutzpartikel in Legierungen, vgl. Abschnitt 4.3), auf Ihre Anwendbarkeit getestet. Umfangreiche Studien mit angepassten Parametern konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. Hier spielt ebenfalls die schlechte Bildqualität eine Rolle, jedoch konnten als entscheidender Faktor die nicht vorhersehbaren Eigenschaften (räumliche Form, etc.) der Objektscharen ausgemacht werden.

In einem weiteren Schritt wurden einfache Parametervergleiche für eine Filterung herangezogen, die eine geringere Anfälligkeit hinsichtlich schlechter Bildqualitäten aufweisen. Mithilfe des Vergleichs des Volumens des jeweiligen Objekts ( $V_{\text{Objekt}}$ ) und des Volumens einer idealen Faser ( $V_{\text{ideal}}$ ) konnte eine Aufteilung der Gesamtmenge der Objekte (203) in drei Teilmengen erfolgen (vgl. Abbildung 6.20). Die Basis für diesen Vergleich stellte das angenommene Volumen einer idealen Fasern  $V_{\text{ideal}}$  von  $3,97 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3$  dar.

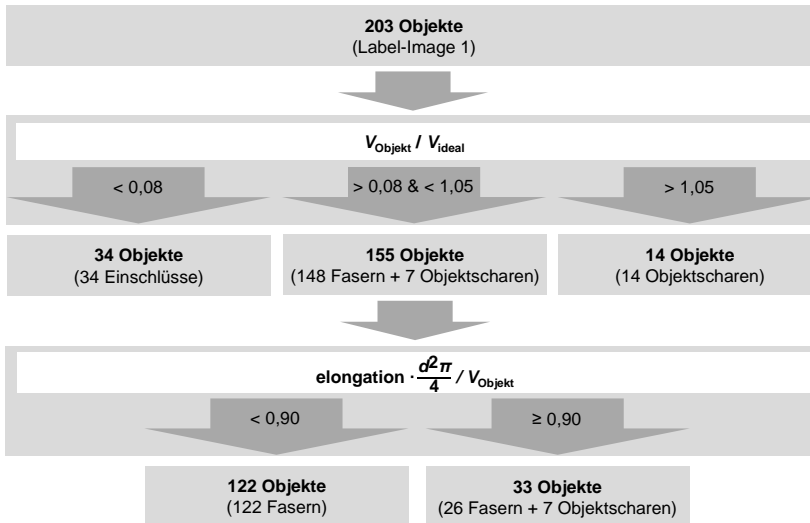


Abb. 6.20: Ablaufschema und Ergebnisse der Vorfilters zur Separierung der drei Objektklassen

Ist  $V_{\text{Objekt}}$  deutlich kleiner als  $V_{\text{ideal}}$  (gewählt 8 % des Idealvolumens) handelt es sich um kleine Objekte. Die 34 auf diese Weise detektierten Einschlüsse bzw. kleinen Faserstücke konnten unter Zuhilfenahme der visuellen Überprüfung validiert werden. Mithilfe bildanalytischer oder geometrischer Verfahren können diese Objekte zusätzlich auf eventuelle Berührungen bzw. Durchdringungen von Schnittflächen untersucht werden. So können tatsächliche Einschlüsse von kleinen Faserstücken unterschieden werden.

Bei einer Überschreitung von  $V_{\text{ideal}}$  von mehr als 5 % kann von einer Objektschar ausgegangen werden. Unter Verwendung dieses Kriteriums konnten 14 Objektscharen identifiziert und visuell bestätigt werden.

Die verbleibende Teilmenge von 155 Objekten beinhaltet sowohl Fasern (148) als auch Objektscharen (7). Für eine weitere Reduzierung der manuell zu untersuchenden Objekte wurde ein weiterer Volumenvergleich durchgeführt.

Der Algorithmus nimmt als vereinfachende Modellannahme an, dass eine Einzelfaser die Form eines Zylinders besitzt, dessen Länge der "elongation"-Länge des Objektes entspricht. Dies erlaubt eine Volumenabschätzung, welche mit dem gemessenen Volumen des Objektes ( $V_{\text{Objekt}}$ ) verglichen wird. Im Falle einer Ansammlung von Fasern ist dieses Volumen deutlich größer, als das auf der Grundlage des Zylindermodells ermittelte. Stimmen die Volumen dagegen annähernd überein, so klassifiziert der Algorithmus das Objekt als Einzelfaser.

Mit dem zuvor geschilderten Vorgehen konnte die Anzahl der manuell zu überprüfenen Objekte auf 33 reduziert werden. Rauschartefakte an den Faseroberflächen führen zu einer Überschätzung des Volumens und somit zu einer fehlerhaften Charakterisierung.

### 6.3.5 Bearbeitung von Objektscharen

Ziel der Bearbeitung einer Objektschar war die Trennung der sich berührenden einzelnen Bestandteile (Einzelfasern und Einschlüsse). Hierzu mussten die aus mehreren Fasern (oder Einschlüssen) bestehenden Konglomerate in einzelne Segmente geteilt werden. Diese Segmente wurden nach ihrer Zugehörigkeit zu einem gesuchten Objekt (Faser oder Einschluss) wieder zusammengesetzt.

Zur Trennung einer Objektschar in einzelne Segmente kam ein Segmentierungsverfahren (Wasserscheidentransformation) zur Anwendung, das die Grauwerte der einzelnen Voxel als Höheninformation interpretiert.

Im vorliegenden Fall handelte es sich um ein Mono-Bild ohne Grauwertverlauf. Hier werden die Binärdaten als Inverse der euklidischen Distanztransformation berechnet. D. h. für jedes Voxel des Vordergrundes („weiß“) wird der kürzeste Abstand zum Hintergrund („schwarz“) bestimmt. Je weiter ein Voxel vom Hintergrund entfernt ist, desto höher wird sein Grauwert gesetzt. Ergebnis ist ein Distanzbild, in dem der jeweilige Grauwert eines Voxels den Abstand zum Hintergrund darstellt.

Auf diese Weise entsteht eine Art Grauwertgebirge (vgl. Abbildung 6.21, ①), das an allen lokalen Maxima eine gedachte Wasserquelle besitzt. Über diese Quellen wird das Gebirge geflutet (vgl. Abbildung 6.21, ②). Die Fließrichtung wird durch die abfallenden Grauwerte bestimmt. An Stellen, an denen sich Wasser aus unterschiedlichen Quellen trifft, wird eine Wasserscheide ausgebildet (vgl. Abbildung 6.21, ③). Diese gibt die Trennlinie zwischen zwei Segmenten (Staubecken) wieder. Damit es infolge des Vorhandenseins von mehreren Maxima im Bereich einer Faser nicht zu einer zu feinen Aufteilung in Einzelsegmente kommt, erlaubt es ein sogenannter „Vorfluterwert“ die minimale Größe eines Staubeckens festzulegen. Wird diese Grenze unterschritten, wird dieses Becken einem benachbarten zugeordnet.

Bei der Wahl des Vorfluterwertes muss besonders auf die Kontaktstellen zwischen den Objekten geachtet werden. Wird dieser Schwellwert zu klein gewählt, wird zwischen den Objekten keine Wasserscheide ausgebildet und die Kontaktstellen befinden sich innerhalb des gleichen Segmentes. Bei einem zu großen Schwellwert wird das Objekt in zu viele Einzelsegmente zerlegt.

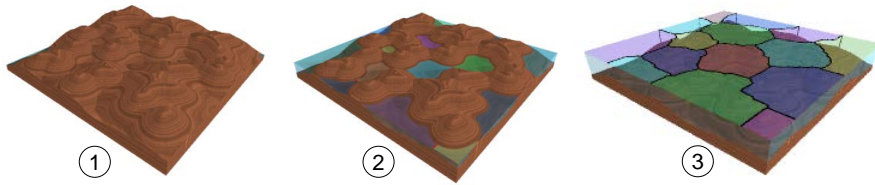


Abb. 6.21: Grafische Darstellung der Wasserscheidentransformation

- ① Grauwertgebirge
- ② Flutung (ansteigender Wasserspiegel)
- ③ resultierende Wasserscheiden

Die Abbildung 6.22 zeigt das Ergebnis der Zerlegung eines Konglomerats von vier Fasern, die sich an drei Punkten berühren. Für die Darstellung wurde ein Ausschnitt aus dem Objekt 141 gewählt. Für eine Entlastung der Grafikkarte (bei der verwendeten Rechnerkonfiguration notwendig) werden die Segmente lediglich in fünf unterschiedlichen Farben dargestellt. Das Objekt 141 bestand nach der Zerlegung aus insgesamt 228 Einzelsegmenten. Der gezeigte Ausschnitt besteht aus 112 Segmenten.

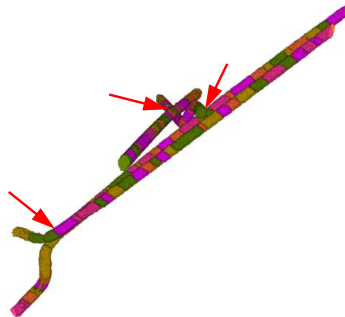


Abb. 6.22: Ausschnitt aus dem Datensatz des zerlegten Objekts 141; Faseranzahl: 4, Berührungspunkte: 3, Segmentanzahl gesamt: 228, Segmentanzahl Ausschnitt: 112

Für das Zusammenführen der einzelnen Segmente müssen alle Schnittebenen hinsichtlich zusammengehörender Segmente untersucht werden. Die zu einem gesuchten Objekt gehörenden Segmente können in den betrachteten Schnittbildern (Slices) markiert (Mausklick) und sodann zusammengeführt werden.

Die Abbildung 6.23 zeigt beispielhaft die Slices der Ebenen xy, xz und yz eines Volumens. Der Koordinatenursprung (Achsenkreuz) befindet sich an einem Berührungspunkt der zu trennenden Objekte.

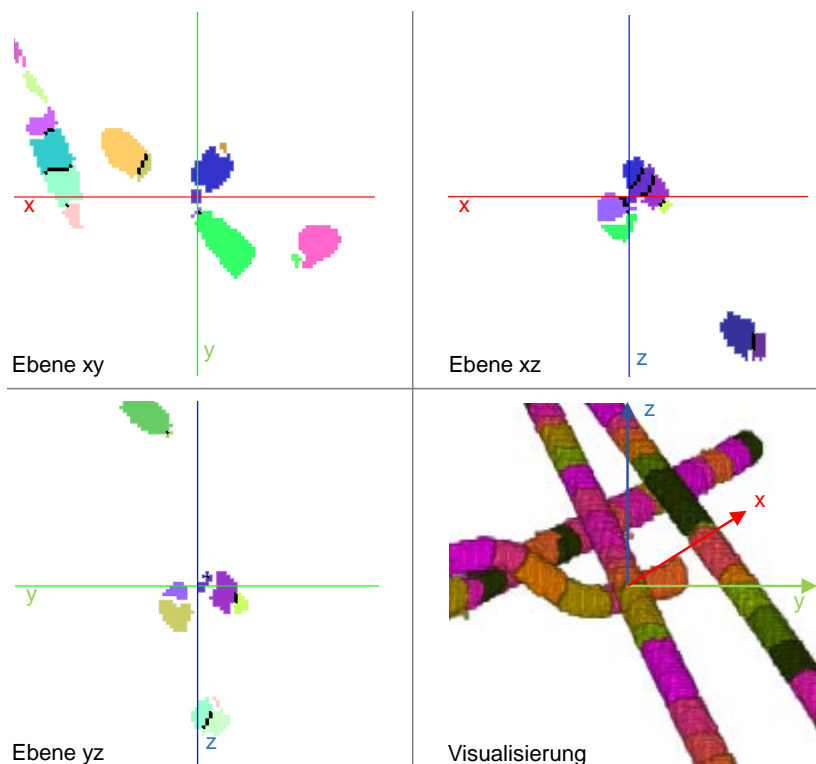


Abb. 6.23: Darstellung der Schnittebenen an einem beispielhaften Volumenausschnitt im Bereich sich berührender Fasern

In dem in Abbildung 6.22 gezeigten einfachen Beispiel mit vier Fasern und drei Berührungspunkten musste ein Bereich von  $741 \times 462 \times 577$  Slices betrachtet werden.

Beliebig komplex kann die Untersuchung bei einer höheren Anzahl von Fasern werden, die sich mehrfach berühren. Abbildung 6.24 zeigt einen Ausschnitt aus einem Objekt (8 Fasern, 8 Berührungspunkte), das aus insgesamt 309 Segmenten besteht. Der Untersuchungsbereich erstreckte sich hier auf  $437 \times 240 \times 716$  Slices.

Aus dem Datensatz (Label-Image 1) mit insgesamt 203 Objekten (148 Fasern, 21 Objektscharen und 34 Einschlüsse) wurden die 21 mittels Vorfilter detektierten bzw. visuell ermittelten Objektscharen in einzelne Datensätze (3D-Bilder) exportiert und zugleich aus dem Datensatz gelöscht. Die nun einzeln vorliegenden Objektscharen wurden nach vorgenannter Vorgehensweise bearbeitet und so in 65 einzelne Objekte getrennt (64 Einzelfasern und ein Einschluss).

Nach dem Wiedereinbinden der nun vereinzelt vorliegenden Objekte in den Originaldatensatz, stand ein Datensatz zur Verfügung, in dem sich nur noch Einzelfasern (212) und Einschlüsse (35) befinden (Abbildung 6.10, vgl. Label-Image 2). Für jedes dieser



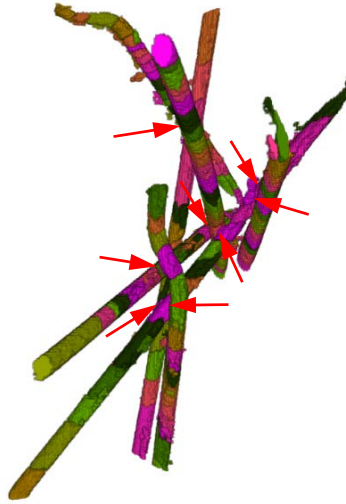


Abb. 6.24: Ausschnitt aus dem Datensatz des zerlegten Objektes 1; Faseranzahl: 8, Berührungspunkte: 8, Segmentanzahl gesamt: 309, Segmentanzahl Ausschnitt: 170

Objekte stehen Merkmale (particle features) zur Verfügung, die eine Charakterisierung erlauben.

## 6.4 Ermittlung von für die Faserwirkung spezifischen Parametern

### 6.4.1 Vorbereiten des Datensatzes

#### 6.4.1.1 Entfernen der Einschlüsse

Die Ermittlung der für das Nachrissverhalten ausschlaggebenden Parameter wurde zunächst nur an der Teilprobe „II“ durchgeführt. Eine Betrachtung von durch die Probenherstellung getrennten Fasern und daraus möglicherweise resultierenden kleineren Faserstücken war daher nicht nötig.

Für das Entfernen der Einschlüsse standen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen sind die Objektnummern der durch die Filterung erkannten Einschlüsse vorhanden und können manuell aus dem Datensatz gelöscht werden. Zum anderen beinhaltet die Software einen Objektfilter (vgl. Abschnitt 4.2.5), mit dessen Hilfe beispielsweise ein Minimalvolumen für die darzustellenden Objekte gewählt werden kann.

Unter Verwendung beider Herangehensweisen konnten die Einschlüsse aus dem mithilfe der Objektsegmentierung erstellten Labelbild (vgl. Abbildung 6.10, „Label-Image 2“) entfernt werden. Ergebnis war ein Datensatz mit 212 Fasern (vgl. Abbildung 6.10, „Label-Image 3“).

Grundsätzlich bedarf es nach einer Veränderung der Objektanzahl einer erneuten Durchführung des Labelings zur Neuordnung der Objektnummern. Folglich ist ein Vergleich der Objektnummern des Ausgangs- und des Ergebnisbildes nicht ohne Weiteres möglich.

### 6.4.1.2 Selektion der rissquerenden Fasern

Für die Ermittlung der für die Nachrisseigenschaften des Stahlfaserbetons ausschlaggebenden Faserparameter sind nur die Fasern von Interesse, die den Riss queren und somit Kräfte über die Rissufer übertragen.

Zunächst wurden die Fasern bzw. Objekte detektiert, die den Riss berühren. Hierzu wurde der Datensatz des segmentierten Risses als zusätzliches Objekt dem Faserbild hinzugefügt und auf sich berührende Voxel mit den 212 Objekten (Fasern) überprüft. Die Auswertung ergab 77 rissberührende Fasern.

Bei einer Subtraktion des Rissbildes vom Faserbild (77 Fasern) zerfallen Fasern, die den Riss queren, in zwei Einzelsegmente. Die rissberührenden Fasern hingegen bleiben als einzelnes Objekt vorhanden. Nach der Durchführung eines erneuten Labelings („reLabeling“) lagen 121 einzelne Objekte mit neuen Objektnummern vor. Die Zuordnung der entstandenen Teilsegmente einer Faser bzw. der verbliebenen ganzen Objekte, zu den vorherigen Objektnummern geschah über einen direkten Pixelvergleich. Hierzu müssen mehrere mathematische Algorithmen aus der Bildverarbeitung angewendet werden. Für solche wiederkehrende komplexe Aufgaben kam, wie schon bei der Filterung der Objektklassen, das Programm „ToolIP - Tool for Image Processing“ *ITWM 2016* zur Anwendung. Im vorliegenden Fall wurde das Ausgangsbild (77 Fasern) mit dem Ergebnisbild (121 Fasern und Teilsegmente) übereinander gelagert und pixelweise miteinander verglichen. Als Ausgabe erhielt man eine Zuordnung zu den ursprünglichen Objektnummern der 77 Fasern.

Die Ermittlung der rissquerenden Fasern erfolgte sodann über das Ausfiltern der nicht in zwei Segmente zerfallenen Objekte. Nach einem erneuten „reLabeling“ und einer Überprüfung der Zuordnung standen für die weiteren Untersuchungen nun zwei Datensätze zur Verfügung. Zum einen ein Labelbild mit 44 rissquerenden Fasern, zum anderen ein Bild mit den 88 Teilsegmenten dieser Fasern.

Visualisierungen der 44, den Riss querenden Fasern, die eine visuelle Überprüfung der im Folgenden ermittelten Parameter erlaubt, können der Anlage B.3 entnommen werden.

### 6.4.2 Ermittlung der Faserorientierungsbeiwerte

#### 6.4.2.1 Allgemeines

Nach der zuvor erläuterten Vorbereitung des Datensatzes stehen für die Ermittlung der Faserorientierungsbeiwerte mehrere Varianten zur Verfügung. Zunächst kann die Faserorientierung  $\eta_\phi$  für das gesamte Volumen des entnommenen Rissbereiches bzw. für alle darin enthaltenen Fasern (212 Fasern, vgl. Abbildung 6.25) durchgeführt werden.

Die Selektion der rissquerenden Fasern (44 Fasern, vgl. Abbildung 6.26) ermöglicht die Ermittlung eines Faserorientierungsbeiwertes  $\eta_{\phi,cr}$  für die tatsächlich am Lastabtrag beteiligten Fasern. Zudem ist es möglich für jede einzelne Faser (n) einen Faserorientierungsbeiwert  $\eta_{\phi,n}$  zu ermitteln. Dies ermöglicht in Verbindung mit der Kenntnis über die räumliche Lage der einzelnen Fasern die Bestimmung eines höhenabhängigen Faserorientierungsbeiwertes  $\eta_{\phi,cr,h}$  der rissquerenden Fasern.



Abb. 6.25: 3D-Visualisierung aller im Probekörpervolumen vorhandenen Fasern (212) mit Darstellung des Risses

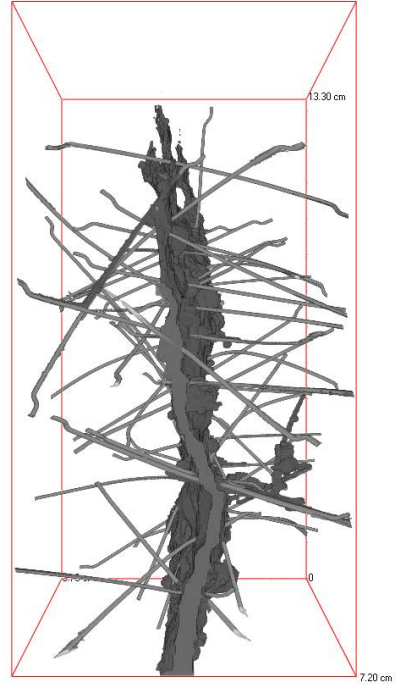


Abb. 6.26: 3D-Visualisierung der 44 rissquerenden Fasern mit Darstellung des Risses

### 6.4.2.2 Orientierung einzelner Fasern

Bei der Einzelbetrachtung der Fasern bzw. der Ermittlung der Faserorientierungsbeiwerte für die einzelnen Fasern zeigte sich die Anwendung der in Kapitel 5 erläuterten Analyse am Fasersystem als nicht zielführend.

Zum einen kommt es aufgrund der schlechten Bildqualität (nach Segmentierung der Fasern) in den Randbereichen zu einer Überbewertung der Fasern („verrauschte“ Oberfläche, Aufdickungen, etc.) sowie in der Probekörpermitte zu einer Unterbewertung der Fasern (Löcher). Dies führt unweigerlich zu Veränderungen der spezifischen Oberfläche  $V_V$  und der Dichte des Integrals der mittleren Krümmung  $M_V$ , die die Basis für

die Analyse am Fasersystem bilden. Die Abweichungen gegenüber einer optimal segmentierten Faser führen zu ungenauen Faserorientierungsbeiwerten. Die Auswirkungen der vorliegenden (bewusst gewählten) schlechten Bildqualität machen sich mit steigendem Fasergehalt bzw. bei einer hohen Faseranzahl im untersuchten Volumen weniger bemerkbar.

Zum anderen beeinflussen die Ausrichtungen der Endhaken sowie eventuell vorhandene starke Verformungen der Fasern aufgrund abweichender Richtungen die ermittelte Faserorientierung ebenfalls. Grundsätzlich gilt auch hier, dass mit steigendem Fasergehalt im untersuchten Volumen die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von stark gebogen Fasern sinkt und somit Abweichungen bei der Ermittlung der Faserorientierungsbeiwerte reduziert werden. Die Auswirkungen der Endaufbiegungen kommen verfahrensbedingt nur bei der Analyse einzelnen Fasern zum Tragen.

Für eine möglichst genaue Ermittlung der Faserorientierungsbeiwerte der einzelnen Fasern wurde im Folgenden ein robusteres Vorgehen gewählt.

Der Faserorientierungsbeiwert wird durch das Verhältnis der auf die Vorzugsachse projizierten Faserlänge zur tatsächlichen Faserlänge definiert (vgl. Abschnitt 2.1.4). Die tatsächliche Länge der Faser wird durch den Wert „elongation“ gegeben, der die maximale geodätische Distanz (vgl. Abschnitt 4.3.5) angibt. Die Projektionslänge auf eine Vorzugsachse  $\phi$  (x, y oder z) entspricht der jeweiligen Kantenlänge einer zu den Hauptachsen parallelen bounding box.

Somit konnten Faserorientierungsbeiwerte  $\eta_{\phi,n}$  für jede der 212 Fasern ermittelt werden.

### 6.4.2.3 Orientierung aller im Probenvolumen befindlicher Fasern

Wie zuvor beschrieben kann die Analyse der Faserorientierung sowohl mit der Systemanalyse als auch durch eine Mittelwertbildung der für die einzelnen Fasern ermittelten Faserorientierungen durchgeführt werden.

Als Datensatz zur Ermittlung der Faserorientierung am Fasersystem (vgl. Abschnitt 5) wurde eine Binarisierung des Labelbildes mit 212 Fasern (vgl. Kapitel 6.4.1.1, Label Image 3) verwendet.

Der direkte Vergleich der Ergebnisse der Systemanalyse ( $\eta_x = 0,67$ ,  $\eta_y = 0,29$  und  $\eta_z = 0,45$ ) mit dem Mittelwert der Einzelergebnisse ( $\eta_x = 0,70$ ,  $\eta_y = 0,26$  und  $\eta_z = 0,42$ ) zeigte die zuvor beschriebene geringe Abweichung bei hoher Faseranzahl.

### 6.4.2.4 Orientierung der rissquerenden Fasern

Die Faserorientierungsbeiwerte  $\eta_{\phi,cr,n}$  der gemäß Abschnitt 6.4.1.2 selektierten den Riss querenden Fasern können Tabelle 6.5 (Spalte 2 - 4) entnommen werden. Die Bestimmung des jeweiligen Faserorientierungsbeiwertes wurde mithilfe der in Abschnitt 6.4.2.2 beschriebenen „robusten“ Methode durchgeführt.

Tab. 6.5: Zusammenfassung der ermittelten faserspezifischen Parameter der rissquerenden Fasern

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Faser	Faserorientierungsbeiwert	Höhenlage	Verformungsfaktor	Einbindelängen [mm]						
$n$	$\eta_{x,cr}$	$\eta_{y,cr}$	$\eta_{z,cr}$	$h$ [mm]	$\delta^f$	$l_1$	$l'_1$	$l_2$	$l'_2$	$l_m$
1	0,24	0,40	0,84	24,6	0,97	18,4	22,5	14,8	①	30,7
2	0,79	0,20	0,51	25,9	0,97	38,9	51,9	11,4	④	4,7
3	0,68	0,22	0,64	15,8	0,97	13,6	32,5	28,1	③	7,4
4	0,82	0,04	0,49	22,7	0,97	30,9	③	30,6	①	11,1
5	0,50	0,19	0,79	33,6	0,96	24,4	①	33,3	①	12,6
6	0,89	0,11	0,15	17,1	0,92	24,0	④	27,3	28,9	15,0
7	0,34	0,37	0,83	33,7	0,98	16,9	35,7	8,9	①	23,4
8	0,96	0,07	0,13	15,7	0,98	6,7	④	35,0	56,0	5,3
9	0,82	0,09	0,48	17,4	0,96	1,2	①	31,5	59,3	7,5
10	0,95	0,14	0,16	22,9	0,98	30,3	57,9	2,0	③	8,1
11	0,58	0,10	0,64	26,7	0,87	5,0	①	43,6	54,9	8,1
12	0,53	0,17	0,79	44,2	0,98	16,4	①	40,6	①	13,7
13	0,87	0,34	0,10	32,6	0,95	17,3	④	40,0	44,2	6,5
14	0,90	0,09	0,34	38,5	0,97	30,9	35,9	24,9	①	7,2
15	0,67	0,33	0,62	52,8	0,97	35,2	①	29,7	③	7,2
16	0,87	0,11	0,29	37,9	0,93	31,5	④	35,5	①	6,3
17	0,93	0,12	0,14	34,2	0,96	30,6	43,1	19,2	④	5,7
18	0,97	0,06	0,12	40,8	1,00	18,3	④	31,7	45,9	3,8
19	0,83	0,11	0,49	56,6	0,98	31,9	①	33,7	③	4,5
20	0,85	0,20	0,40	53,7	0,98	28,3	③	35,9	①	5,1
21	0,71	0,23	0,31	60,9	0,76	26,7	③	35,3	35,3	7,1
22	0,78	0,06	0,57	65,8	0,98	35,7	①	17,6	26,0	6,4
23	0,64	0,06	0,73	53,8	0,99	10,5	① ③	52,8	①	6,3
24	0,54	0,10	0,78	97,0	0,97	57,9	①	10,3	①	6,9
25	0,90	0,07	0,35	66,5	0,97	43,4	62,6	2,3	①	3,2
26	0,94	0,11	0,12	53,9	0,97	32,8	50,9	14,1	③	2,9
27	0,94	0,14	0,08	57,9	0,97	34,4	59,5	3,2	①	5,3
28	0,58	0,51	0,49	79,2	0,93	36,9	①	28,1	①	7,8
29	0,14	0,22	0,95	92,5	0,99	29,9	①	32,8	①	9,7
30	0,92	0,11	0,20	67,4	0,96	27,0	③ ④	37,9	①	3,8
31	0,93	0,13	0,14	66,7	0,96	8,3	49,1	16,0	③ ④	2,9
32	0,93	0,19	0,11	73,3	0,97	35,8	54,2	10,2	③	3,6
33	0,70	0,39	0,51	90,8	0,96	33,8	①	34,2	①	2,7
34	0,85	0,05	0,44	88,9	0,97	42,9	48,7	16,5	① ③	2,7
35	0,90	0,10	0,23	83,9	0,94	29,7	①	30,6	35,6	2,7
36	0,95	0,14	0,22	78,2	1,00	34,0	37,6	25,5	①	4,9
37	0,73	0,45	0,29	77,8	0,91	28,5	33,7	30,5	①	3,8
38	0,85	0,25	0,36	91,1	0,97	45,7	45,7	20,3	①	2,2
39	0,78	0,19	0,50	74,9	0,96	2,8	①	47,4	57,3	7,9
40	0,86	0,24	0,36	94,0	0,97	45,5	56,4	9,4	③	2,2
41	0,87	0,29	0,23	88,4	0,96	39,4	①	25,7	③	3,2
42	0,97	0,05	0,16	80,0	1,00	2,9	①	28,6	35,6	3,8
43	0,71	0,57	0,16	85,8	0,93	35,5	43,0	20,7	③	4,3
44	0,90	0,16	0,21	103,0	0,94	41,01	①	28,37	① ③	1,58

Der Faserorientierungsbeiwert  $\eta_{\phi,cr}$  für alle den Riss querenden Fasern im betrachteten Volumen bzw. Rissbereich ergibt sich aus dem Mittelwert der summierten Einzelwerten  $\eta_{\phi,cr,n}$  oder der Analyse am Fasersystem des binarisierten Label-Images. Demnach ergaben sich mittels Systemanalyse folgende Faserorientierungsbeiwerte:  $\eta_{x,cr} = 0,72$ ,  $\eta_{y,cr} = 0,28$  und  $\eta_{z,cr} = 0,42$ . Der Vergleich mit den Ergebnissen der Einzelfaserbetrachtung (Mittelwert der 44 Einzelfasern bzw. -orientierungsbeiwerte) von  $\eta_{x,cr} = 0,77$ ,  $\eta_{y,cr} = 0,19$  und  $\eta_{z,cr} = 0,40$  zeigt bei den Richtungen x und y etwas stärkere Abweichungen als bei Betrachtung der Gesamtzahl der Fasern im Probekörper.

Diese Abweichungen resultieren aus der Bildqualität der CT-Aufnahme und der damit verbundenen Qualität des für die Systemanalyse verwendeten Binärbilds. Wie zuvor gezeigt fallen diese analysebedingten Abweichungen bei höheren Fasergehalten weniger ins Gewicht. Für weiterführende Untersuchungen unter Betrachtung von Parametern einzelner Fasern (Orientierung, Einbindelänge, etc.) sollte auf das zuvor beschriebene „robustere“ Verfahren zurückgegriffen werden.

### 6.4.2.5 Orientierung der rissquerenden Fasern in Abhängigkeit der Höhenlage

Zur Ermittlung eines höhenabhängigen Faserorientierungsbeiwertes  $\eta_{\phi,cr,h}$  wurde zunächst die räumliche Lage des sich zwischen den Rissflanken befindlichen Faserbereichs bzw. -stücks anhand dessen Schwerpunktes bestimmt.

Zur Detektion dieses Faserbereiches wurde jede Faser mit dem Riss überlagert und die so gefundenen Teilstücke (Überlappungen Riss-Faser) extrahiert. Diese Überlappung besteht aus einer Menge von Voxeln  $i$ . Mit der Annahme, dass jedes dieser Voxel ein Gewicht  $F_i$  von „1“ besitzt konnte der Schwerpunkt  $x_s$  mithilfe der Formel 6.1 zur Schwerpunktermittlung bestimmt werden.

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (6.1)$$

Mit:

- $F_i$  :            Gewicht des jeweiligen Voxels mit dem Wert „1“
- $x_i$  :            Hebelarm des jeweiligen Voxels

Infolge der „verrauschten“ Faseroberfläche handelt es sich bei dieser Vorgehensweise eher um eine Approximation des Schwerpunktes. Jedoch ist aufgrund der relativ kleinen Rissbreiten bis maximal 3,6 mm und der daher nur recht kleinen im Riss befindlichen „Faserstücke“ eine solche Näherung als ausreichend zu bewerten.

Im vorliegenden Fall war zunächst nur die Höhenlage der Fasern von Interesse, daher wurde die Auswertung auf die z-Achse begrenzt. Die Ergebnisse können der Tabelle 6.5 (Spalte 5) entnommen werden.

### 6.4.3 Faserverformung

Grundsätzlich sollten die verwendeten Stahlfasern eine ausreichende Steifigkeit aufweisen, die eine Verformung der Fasern beim Misch- und Betoniervorgang verhindert. Die verwendeten Stahlfasern besitzen nach Angabe des Herstellers eine solche Steifigkeit.

Bei Betrachtung der Visualisierungen fallen jedoch mehrere Fasern mit deutlichen Verformungen auf. Diese stark gebogenen Formen können in erster Linie auf das Einfüllen des Betons in die Balkenschalungen zurückgeführt werden. Zur Vermeidung einer Igelbildung wird der Beton mittels Probennahmeschaufel (Rechteckschaufel) in die Schalung eingebracht (vgl. *DAfStb 2015*). Je nach Fasergehalt muss hierfür eine gewisse Kraft aufgewendet werden. Eine „Beschädigung“ einzelner Fasern kann hierbei nicht ausgeschlossen werden.

Zur Beschreibung der Stärke der beigebrachten Biegung der Faser wird im Folgenden ein Verformungsfaktor  $\delta^f$  eingeführt. Dieser beschreibt das Verhältnis des „maximum feret diameter“ zur „elongation“-Länge. Der „maximum feret diameter“ beschreibt hierbei die kürzeste Distanz der voneinander entferntesten Punkte der Faser, die „elongation“-Länge die maximale geodätische Distanz (vgl. Abschnitt 6.3.3).

Bei einer ideal geraden Faser sollte der Verformungsfaktor dem Wert „1,00“ entsprechen. Aufgrund der Aufkröpfungen der Faserenden ist jedoch die „elongation“-Länge auch bei einer ideal geraden Faser größer als der „maximum feret diameter“. Infolgedessen kann bei einem direkten Vergleich das Verhältnis 1,0 nicht erreicht werden. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse mit dem höchsten ermittelten Verhältniswert, sprich dem Wert einer ideal geraden Faser normiert (0,98). Die Ergebnisse können Tabelle 6.5 (Spalte 6) entnommen werden. Aufgrund des Vorhandenseins von zwei oder nur einem Endhaken und dessen Einfluss auf die „elongation“-Länge kann diese Herangehensweise nur als Näherung bezeichnet werden.

Jedoch zeigt der Vergleich der normierten Werte mit den Visualisierungen (vgl. Anlage B.3) deutlich erkennbare Abstufungen. So liegt der Verformungsfaktor  $\delta^f$  für gerade oder durch die Verschiebung der Rissufer leicht verformte Fasern im Bereich 1,00 bis 0,95 (vgl. Abbildung 6.27, ①). Werte zwischen 0,95 und 0,90 stehen für leicht gebogene Fasern (vgl. Abbildung 6.27, ②). Bei stark verformten Fasern sind die Werte kleiner 0,90 (vgl. Abbildung 6.27, ③).

### 6.4.4 Einbindelänge

Zur Bestimmung der Einbindelängen der Fasern in die Rissflanken können die „elongation“-Längen der in Abschnitt 6.4.1.2 ermittelten Teilsegmente herangezogen werden. Der Tabelle 6.5 können die Ergebnisse für die Einbindelänge des jeweiligen Faserstücks  $l_1$  (Spalte 7) und  $l_2$  (Spalte 9) sowie der Länge des sich im Riss befindlichen Fasersegments  $l_m$  (Spalte 11) entnommen werden.

Die Zuweisung der Bezeichnungen  $l_1$  und  $l_2$  erfolgen nicht richtungsgebunden entlang der x-Achse. Verfahrensbedingt beginnt die Detektion („Labeling“) der Objekte von un-

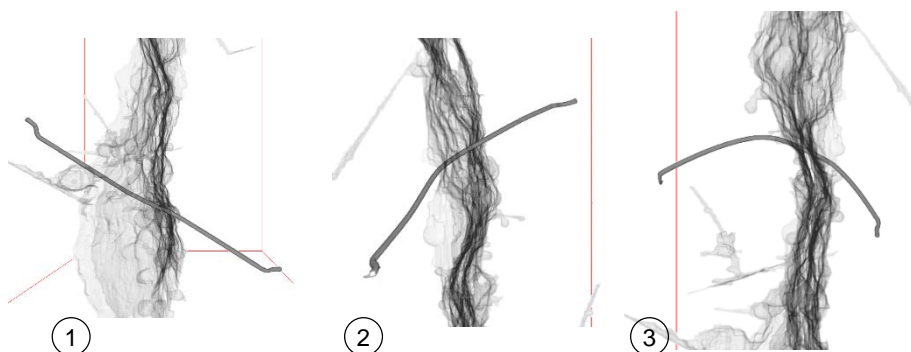


Abb. 6.27: Darstellung unterschiedlicher Formfaktoren. Zur besseren Darstellung wurde der Riss jeweils transparent dargestellt

- ① Gerade Faser (Label 4):  $\delta^f = 0,97$
- ② Leicht gebogene Faser (Label 28):  $\delta^f = 0,93$
- ③ Stark gebogene Faser (Label 21):  $\delta^f = 0,76$

ten nach oben. Abbildung 6.28 zeigt eine beidseitig eingebundene Faser mit Bezeichnung der einzelnen Längen.

Die „elongation“-Länge gibt die geodätische Entfernung (Länge) zwischen den voneinander entferntesten Voxeln des Objektes wieder. Somit werden die vorhandenen Endaufbiegungen in die Längenbestimmung miteinbezogen. Dies ermöglicht bei bekanntem Durchmesser der Faser die Bestimmung der tatsächlichen Verbundfläche (Mantelfläche des Fasersegmentes).

Die Art der Herstellung der Probekörper hat zur Folge, dass Fasern teilweise durch die Sägeschnitte gekürzt wurden. D. h. sie befinden sich nur teilweise im untersuchten Volumen. Dies ist durch das Vorhandensein nur einer Aufbiegung gekennzeichnet (vgl. Abbildung 6.28, rechts). Wurde eine solche Faser gefunden, kann die „elongation“-Länge des Faserstücks ohne Endhaken unter Berücksichtigung der Länge des im Rissbereiches befindlichen Faserstücks  $l_m$  auf die volle Länge einer idealen Faser rechnerisch verlängert werden (vgl. Tabelle 6.5  $l'_1$  (Spalte 8) und  $l'_2$  (Spalte 10)). Für diese nachträgliche Bestimmung der Einbindelänge wurde eine Gesamtlänge einer Faser („elongation“-Länge) von 68 mm angenommen. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert der vollständig dargestellten Fasern.

Die Detektion der rissquerenden Fasern beruht auf der Unterscheidung von Objekten die nach dem „Ausstanzen“ des Risses in ein oder zwei Teile zerfallen. Die Trennung in zwei Teile zeigt eine rissquerende Faser an. Fehlerquellen können bei diesem Vorgehen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Beispielsweise kam es bei einer stark gekrümmten Faser (Label 11, vgl. Anlage B.3) im Bereich der Aufkröpfung zu einem solchen „Fehler“. Obwohl die Faser nur eine Rissflanke durchdringt, kommt es infolge der Krümmung zu einer Zerteilung der Faser in zwei Segmente. Die Suche nach solchen Sonderfällen, bei denen die Faser nicht zur Kraftübertragung beiträgt, kann momentan nur rein visuell erfolgen. Eine automatisierte Detektion wird jedoch angestrebt.



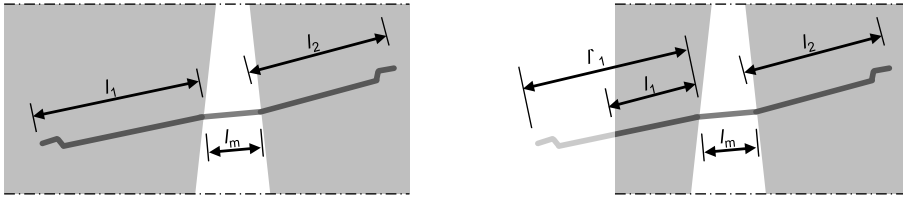


Abb. 6.28: Darstellung der Einbindelängen einer Faser in die Rissflanken

- links: Faser mit zwei Endhaken im untersuchten Volumen.  $l_1$  und  $l_2$  entsprechen der Einbindelänge
- rechts: Faser mit nur einem Endhaken im untersuchten Volumen. Die wahre Länge des abgetrennten Faserstücks  $l'_1$  kann rekonstruiert werden

In Abhängigkeit von Fasergeometrie und Betonfestigkeit führen nach *Naaman 2004* kurze Einbindelängen  $< 6 \text{ mm}$  zu Abplatzungen der Betonmatrix. Gleiches gilt für Fasern, die den Riss mit einem großen Winkel queren. Über erhöhte Reibungskräfte an den Umlenkpunkten erhöht sich der Auszugswiderstand, sodass hieraus Kantenabbrüche der Betonmatrix resultieren können. Aufgrund der eher qualitativen Darstellung des segmentierten Risses können solche Details für eine genauere Untersuchung zur Zeit nicht ausreichend detailliert dargestellt werden. Dies ist auf die verwendete Aufnahmetechnik und/oder die auf einen hohen Durchsatz optimierte Aufnahmezeit und der daraus resultierenden Bildqualität zurückzuführen. Für eine optimale Darstellung der beiden gesuchten Komponenten Faser (Stahl) und Riss (Luft) können auch getrennte CT-Aufnahmen mit unterschiedlichen, auf die gesuchte Komponente angepassten Einstellungen verwendet werden.

#### 6.4.5 Verformung der Faserenden

Neben dem Haft- und Reibungsverbund steht bei Fasern mit Endhaken der zusätzliche Formverbund der Auszugskraft entgegen. Nach dem Verlust des Haftverbundes entsteht ein Kanal über den die Faser ausgezogen wird. Infolge dessen erhöhen die an den Umlenkpunkten entstehenden plastischen Gelenke den Widerstand gegen das Ausziehen der Faser (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

Eine Verformung eines Endhakens zeigt den Wegfall des Haftverbundes an. Demnach wird auf der betrachteten Einbindeseite die Auszugskraft nur noch durch den Reibungsverbund und der bei der Kaltverformung der Faser an den Umlenkpunkten benötigten Energie bestimmt.

Abbildung 6.29 zeigt beispielhaft eine Faser mit Verformung eines Faserendes. Aufgrund der einseitig größeren Einbindelänge und der damit verbundenen größeren Verbundfläche wurde die Faser nur einseitig ausgezogen.

Für Faserauszugsversuche im Computer-Tomografen wurde eine Lastzelle entwickelt. Der in Abbildung 6.30 (links) gezeigte Versuchsaufbau ermöglicht die in-situ Beobachtung des Faserauszugs unter Verwendung unterschiedlichster zylindrischer Probestformen (eingeschnürt, gekerbt, etc.). Hierzu wurden für unterschiedliche Laststufen einzelne CT-Aufnahmen erzeugt.

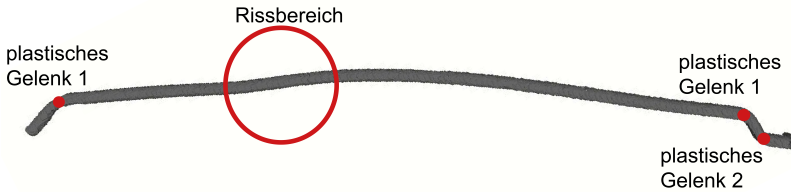


Abb. 6.29: beispielhafte Darstellung einer Verformung eines Faserendes

Abbildung 6.30 (rechts) zeigt unterschiedliche Stadien des Faserauszugs, die mittels eines Auszugversuchs einer Einzelfaser erstellt wurden. Aufgrund der für diese Aufnahmen verwendeten Probekörperabmessungen konnte eine hohe Auflösung und ein guter Kontrast erzielt werden. Infolge dessen war die zusätzlich qualitative Darstellung des Auszugskanals möglich. Diese erfolgte über die Bildung von Differenzbildern der benachbarten Laststufen. Hierbei bleiben eventuell vorhandene Stauchungen des Betons unberücksichtigt. Solche Stauchungen können durch Spannungskonzentrationen (in Abhängigkeit der Betonfestigkeit) an den Umlenkstellen entstehen.

Die in Abbildung 6.30 (rechts) dargestellten Auszugstadien können den in den Grundlagen (Abschnitt 2.1.2.2) schematisch dargestellten Stadien des Faserauszugs zugeordnet werden. Im Folgenden werden diese an dem Einzelfaserauszug ermittelten Stadien stichpunktartig beschrieben.

- ① keine Verformung erkennbar, voller Haftverbund (vgl. Abbildung 2.7, Bereich 0-a)
- ② Auszugskanal sichtbar, keine visuell erkennbare Verformung, Lösung des Haftverbunds (vgl. Abbildung 2.7, Übergang Bereich b-c zu Bereich c-d)
- ③ Vergrößerung des Auszugskanals, sichtbare Verformung, zwei Umlenkpunkte vorhanden (vgl. Abbildung 2.7, Bereich c-d)
- ④ Vergrößerung des Auszugskanals, sichtbare Verformung, ein Umlenkpunkt vorhanden (vgl. Abbildung 2.7, Bereich d-e)

Aufgrund der zur Zeit nur rein visuell möglichen Untersuchung können die Stadien ① und ② nicht unterschieden werden. Erst bei einer sichtbaren Verformung an den Umlenkpunkten (③ und ④) kann eine Bewertung durchgeführt werden. Dementsprechend wurden die beobachteten Verformungen der Endhaken in Tabelle 6.5 entsprechend den Stadien ①, ③ und ④ dokumentiert. Bei Vorhandensein eines Endhakens beinhalten die Spalten 8 und 10 das jeweilige visuell ermittelte Verformungsstadium. Wurde das Faserende durch einen Sägeschnitt abgetrennt, sind in diesen Spalten die berechneten Einbindelängen  $l_1$  bzw.  $l_2$  eingetragen.

Ausschlaggebend für das Auszugverhalten einer Faser ist der Haft-, Reibe- und Formverbund. Unter idealisierten Randbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der geringeren Mantelfläche die Faserseite mit kürzerer Einbindelänge ausgezogen wird und somit eine Verformung des Endhakens ersichtlich wird. Jedoch zeigen sich bei Betrachtung der ermittelten Parameter teilweise hiervon abweichende Ergebnisse. Begründet werden kann dies u. a. durch das Vorhandensein gestörter Verbundbereiche zwischen Faser und Betonmatrix sowie einer möglichen Stauchung der

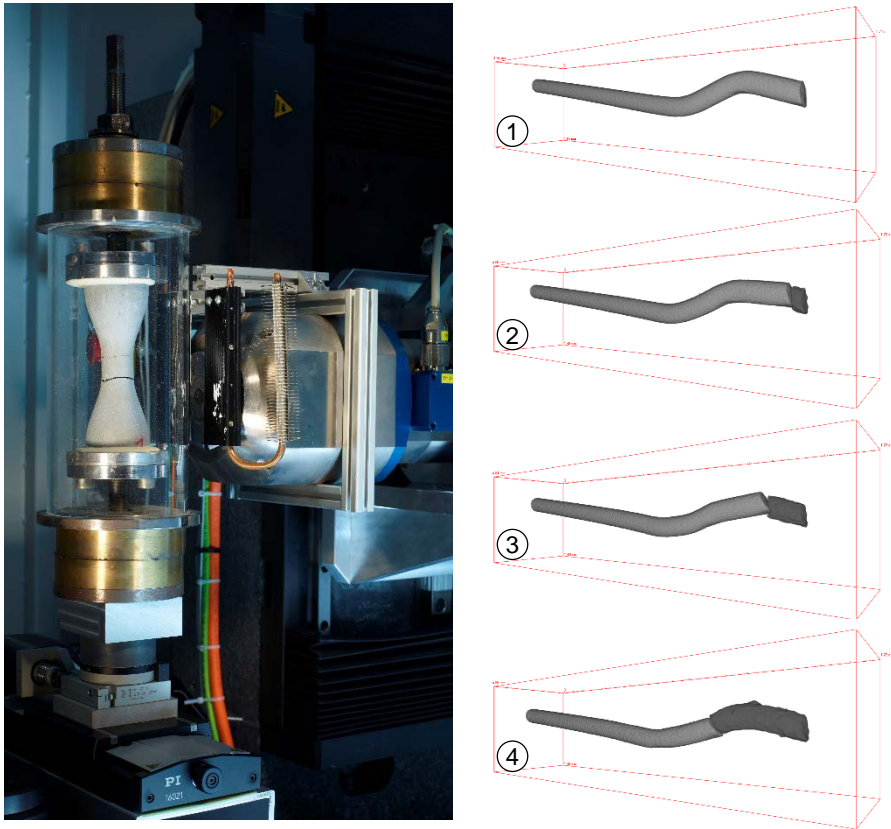


Abb. 6.30: Lastzelle zur Beobachtung des Faserauszugverhaltens

- links: Lastzelle zur in-situ Beobachtung des Faserauszugs  
rechts: Mittels Differenzbilder visualisierte Auszugstadien einer Einzelfaser (hellgrau), Auszugskanal (dunkelgrau)

Betonmatrix und/oder deren Abbruch im Umlenkbereich (in Abhängigkeit der Rissbreite und dem Winkel unter dem die Faser den Riss schneidet).

### 6.4.6 Gerissene Fasern

Aufgrund des angestrebten duktilen Verhaltens (kein schlagartiges Versagen) von Stahlfaserbeton sollte ein Reißen der Stahlfasern vermieden werden. In dem vorliegenden Datensatz wurden keine gerissenen Fasern detektiert. Andere Versuche mit höheren Betondruckfestigkeiten (besserer Verbund) zeigten eine für die Analyse nicht unerhebliche Anzahl an gerissenen Fasern im unteren Drittel (größte Rissweite) der Biegebalen.

Je nach Abstand der beiden Faserhälften werden diese beim „Labeling“ als getrennte Objekte erkannt. Für eine universelle Anwendbarkeit des in diesem Kapitel vorgestell-

ten „Werkzeugs“ müssen gerissene Fasern zielsicher detektiert werden. Dies kann ebenfalls über den zuvor erläuterten direkten Pixelvergleich erzielt werden.

### 6.5 Schlussfolgerungen

Bisher angewendete Verfahren zur Ermittlung der Faserorientierung und -menge im Bereich gerissener Querschnitte beruhen auf dem Aufbrechen des Rissbereiches oder der optoanalytischen Auswertung von „rissnahen“ Schnittflächen. Hierbei kann es zu Verfälschungen der Ergebnisse kommen. Zum einen kommt es durch das Aufbrechen zum nachträglichen Ausziehen oder Reißen der Fasern. Zum anderen ist eine Analyse des gesamten Rissbereiches über die Betrachtung von Schnittflächen nicht möglich.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren ermöglicht erstmals die ungestörte Untersuchung von Rissbereichen und eine auf die rissquerenden Fasern fokussierte Betrachtung.

Neben der standardmäßigen Ermittlung der Orientierung und Menge der rissquerenden Fasern ist eine Analyse der einzelnen Fasern hinsichtlich Einbindelänge in die Rissufer und einer eventuell vorhandenen Verformung der Endhaken möglich. Diese standardmäßig ermittelten Parameter können direkt in bereits vorhandene Modelle zur Beschreibung des Nachrissverhaltens von Stahlfaserbeton übernommen werden. Beispielsweise können die von *Strack 2007* zum Ansatz gebrachten Wirksamkeitsfaktoren zur Berücksichtigung der Einflüsse aus Fasermenge, -orientierung und Verbundspannung  $\kappa_I$  sowie den Einflüssen aus Fasermenge, -orientierung und Verbundspannung bzw. die Wirkung einer geometrischen Faserverformung  $\kappa_{II}$  bestimmt werden.

Bei Betrachtung dieser zusätzlichen Parameter können Rückschlüsse auf die vorherrschenden Verbundeigenschaften (Haft-, Reibe- und Formverbund) getroffen werden. Gerade in Kombination mit den in-situ Versuchen zum Faserauszug (Lastzelle) sind genauere Untersuchungen zum sogenannten „snubbing“ denkbar. Der Begriff „snubbing“ umfasst hierbei Effekte, die beim Auszug von Fasern entstehen, die nicht optimal in Zugkraftrichtung ausgerichtet sind. Infolge eines flacheren Winkels (zum Rissufer), unter dem die Faser ausgezogen wird, entstehen Verformungen der Faser. Aufgrund der so entstandenen Umlenkpunkte kommt es zu einer Erhöhung der Reibungskräfte. Die Fragestellung, ob dieser Effekt, unter dem es zu Stauchungen und/oder Abplatzungen der Betonmatrix kommen kann, eine messbare Erhöhung oder eher durch den reduzierten Haft- bzw. Reibeverbund zu einer Reduzierung der Auszugskraft kommt, ist in der Literatur nicht abschließend geklärt.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Die durchgeführten Versuchsreihen an Faserbetonen mit unterschiedlichen untersuchten Volumina sowie Faserarten und -gehalten konnten die Durchführbarkeit einer Richtungsanalyse der Fasern auf Basis von Computer-Tomografie-Aufnahmen bestätigen. Grundlage der bildanalytischen Ermittlung der Faserorientierung und -menge bildet die Segmentierung des Fasersystems, an dem die Analyse durchgeführt wird. Anhand von geometrischen Basiskenntgrößen (Dichten etc.), die aus dem dreidimensionalen Datensatz gewonnen werden, lassen sich die Parameter zur Ermittlung des Faserorientierungsbeiwertes und des Fasergehaltes bestimmen.

Anhand der durchgeführten Machbarkeitsstudien, den Arbeiten zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie den vergleichenden Versuchen mit dem induktiven Verfahren wurde eine Basis für die Nutzung des CT-Verfahrens als zuverlässiges Werkzeug für die Ermittlung von Faserorientierung, -verteilung und -menge geschaffen.

Mithilfe der erzielten Erkenntnisse und der stetigen Weiterentwicklung konnte dieses Verfahren zur Lösung von typischen Fragestellungen des konstruktiven Bauingenieurwesens eingesetzt werden. Als Beispiel seien hier die Untersuchungen an Tunneltübbings zur Bestimmung des anzusetzenden Faktors zur Berücksichtigung der Faserorientierung  $\kappa_F$  genannt.

Eine Weiterentwicklung der am Fasersystem durchgeführten Analyse bildet die sogenannte Objektsegmentierung. Der Fokus lag zunächst auf der Charakterisierung von Fasern. Dieses Verfahren sollte für die Untersuchung von rissquerenden Fasern in geprüften Biegebalken weiterentwickelt bzw. angepasst werden.

Die Objektsegmentierung, die eine Zerlegung des Fasersystems in Einzelfasern erlaubt, bildet die Basis für die Betrachtung, Charakterisierung und Analyse einzelner Fasern. Die Segmentierung der Objekte erfolgt anhand einer Überprüfung von Nachbarschaftsbeziehungen einzelner Voxeln. Liegen Voxel mit dem Wert „1“ innerhalb des gewählten Nachbarschaftsrasters, werden diese einem Objekt zugeordnet. Im einfachsten Fall befinden sich die zu segmentierenden Objekte relativ weit voneinander entfernt und berühren sich nicht. Infolge sich berührender und/oder nahe beieinander liegender Fasern kommt es zur Bildung von Objekten, die aus mehreren Fasern bestehen (Objektscharen).

Für eine Analyse müssen diese Objektscharen detektiert und in einzelne Fasern zerlegt werden. Unter Verwendung ermittelter Objekteigenschaften und daraus entwickelter Vergleichsparameter erfolgte eine Charakterisierung bzw. Kategorisierung aller Objekte, sodass eine Filterung der Objektscharen ermöglicht wurde.

Die Trennung der Fasern erfolgte zunächst mithilfe eines sogenannten „watersheed“-Verfahrens, dass die zu bearbeiteten Objekte in viele Einzelsegmente aufteilt. In einem händischen Verfahren wurden diese Objekte (meist mehrere Hundert) nach ihrer Zugehörigkeit zu den gesuchten Einzelfasern zusammengesetzt. Aufgrund dieses sehr zeitaufwendigen Vorgehens, dass für die angedachte Anwendung auf größere Versuchsserien als ungeeignet einzustufen ist, wurde basierend auf den in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnissen am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) ein Algorithmus entwickelt, der eine schnellere und zuverlässigere Trennung der Objekte erlaubt.

Die zuvor genannten Arbeiten zur Kategorisierung und Bearbeitung der Objekte wurden mittels einer umfangreichen visuellen Auswertung validiert. Hierzu wurden alle vorhandenen Objekte mittels 3D-Visualisierungen untersucht und visuell erkenn- bzw. beschreibbare Merkmale, die eine Charakterisierung der Objekte erlauben, dokumentiert.

Basierend auf diesen umfangreichen Vorarbeiten konnte mithilfe weiterer auf der Bildverarbeitung basierender Arbeitsschritte ein Datensatz erstellt werden, der nur noch alle rissquerenden Fasern enthielt. Dies ermöglichte im Folgenden eine detaillierte Untersuchung der tatsächlich am Lastabtrag beteiligten Fasern. Zielsetzung war hierbei, die für die Kraftübertragung relevanten Parameter zu ermitteln, die mit bisherigen Herangehensweisen nicht oder nur zerstörend untersucht werden konnten.

Unter Zuhilfenahme ausgewählter Objekteigenschaften („particle features“) konnten sodann Form, Orientierung und räumliche Lage jeder einzelner Faser ermittelt werden. U. a. ermöglichte dies die Bestimmung eines höhenabhängigen Faserorientierungsbeiwertes. Ebenso wurden die Einbindelängen der Fasern in die jeweilige Rissflanke ermittelt sowie etwaige Verformungen der Endhaken dokumentiert.

Die auf diese Weise beobachteten Wirkmechanismen und präzisierten Parameter sollen die Möglichkeit bieten, das Verhalten von Stahlfaserbeton im Nachrissbereich besser verstehen bzw. im nächsten Schritt Modellvorstellungen bzw. Bemessungsmodelle verfeinern zu können.

## 7.2 Ausblick

Wie die in Kapitel 5 beschriebene Analyse am Fasersystem zeigt, ermöglicht diese Methode zur Richtungsanalyse von Stahlfasern in Beton bereits eine praxistaugliche Anwendung an größeren Probenserien. Verbesserungs- bzw. Weiterentwicklungsmöglichkeiten bestehen hier beispielsweise in der Optimierung der Aufnahmetechnik, so dass verwertbare Aufnahmen von Proben mit Durchstrahlungsdicken größer 100 mm möglich werden. Des Weiteren können wiederkehrende Abfolgen von Filteranwendungen und/oder Analyseschritten mithilfe geeigneter Software automatisiert werden. Ein am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik entwickeltes modulares Softwaretool „TollIP“ (vgl. *ITWM 2016*) erlaubt bereits die Erstellung sogenannter Graphen, die beispielsweise die Reihenfolge bestimmter anzuwendender Filter regelt.

Die Betrachtung einzelner Fasern als Objekt und die damit verbundene Möglichkeit der Charakterisierung (vgl. Kapitel 6) bedingt die vorherige Segmentierung der einzel-

nen Fasern aus dem „Fasersystem“. Die beschriebene Vorgehensweise zur Bearbeitung bzw. Trennung von Objektscharen mittels der standardmäßig vorhandenen Tools des Analyseprogramms zeigten sich hinsichtlich des erheblichen Arbeits- und Zeitaufwands für die Anwendung auf große Versuchsserien als aufwändig. Auch hier könnte der Aufwand für die Bearbeitung der Bilddaten sowohl durch angepasste Aufnahmetechnik, die „bessere“ Aufnahmen liefert, als auch durch eine Automatisierung von Arbeitsschritten reduziert werden.





# Literaturverzeichnis

## *Abolitz u. Agbim 1964*

ABOLITZ, A. ; AGBIM, C.: Discussion of: Romualdi, J.; Mandel, J.: Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement. In: *ACI Journal* 61 (1964), Nr. 12, S. 1651–1656

## *Altendorf u. Jeulin 2009*

ALTENDORF, H. ; JEULIN, D.: 3rd Directional Mathematical Morphology for Analysis of Fiber Orientations. In: *Image Analysis and Stereology* 28 (2009), Nr. 3, S. 143–153

## *ASTM F1877-05 2010*

ASTM F1877-05: *Practice for Characterization of Particles*. West Conshohocken, PA, 2010

## *Aveston u. Kelly 1973*

AVESTON, J. ; KELLY, A.: Theory of Multiple Fracture of Fibrous Composites. In: *Journal of Material Science* 8 (1973), S. 352–362

## *Banthia u. Trottier 1994*

BANTHIA, N. ; TROTTIER, J.-F.: Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers: Part I: Bond-Slip Mechanisms. In: *ACI Materials Journal* 91 (1994), Nr. 5, S. 435–446

## *Barequet u. Har-Peled 2001*

BAREQUET, G. ; HAR-PELED, S.: Efficiently Approximating the Minimum-Volume Bounding Box of a Point Set in Three Dimensions. In: *Journal of algorithms* 38 (2001), Nr. 1, S. 91–109

## *Barnett u. a. 2010*

BARNETT, S. J. ; LATASTE, J.-F. ; PARRY, T. ; MILLARD, S. G. ; SOUTSOS, M. N.: Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength. In: *Materials and Structures* 43 (2010), Nr. 7, S. 1009–1023

## *Bartos u. Hoy 1996*

BARTOS, P. J. M. ; HOY, C. W.: Interaction of particles in fibre reinforced concrete. In: BARTOS, P. J. M. (Hrsg.) ; MARRS, D. L. (Hrsg.) ; CLELAND, D. J. (Hrsg.): *Production methods and workability of concrete*. London and New York : E & FN Spon, 1996 (RILEM proceedings), S. 451–461

## *Bekaert 2012*

BEKAERT ; BEKAERT GMBH (Hrsg.): *Die neue Generation der Stahlfaser: Broschüre Dramix*. 2012

## *Berg u. a. 2008*

BERG, M. d. ; CHEONG, O. ; VAN KREVELD, M.: *Computational geometry: Algorithms*

*and applications*. 3rd ed. Berlin : Springer, 2008

**Bonzel u. Schmidt 1984a**

BONZEL, J. ; SCHMIDT, M.: Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. In: *beton* 34 (1984), Nr. 11, S. 463–470

**Bonzel u. Schmidt 1984b**

BONZEL, J. ; SCHMIDT, M.: Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. In: *beton* 34 (1984), Nr. 12, S. 501–504

**Bonzel u. Schmidt 1985**

BONZEL, J. ; SCHMIDT, M.: Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. In: *beton* (1985), Nr. 12, S. 27–32

**Brandt 1985**

BRANDT, A. M.: On the optimal direction of short metal fibres in brittle matrix composites. In: *Journal of Material Science* 20 (1985), Nr. 11, S. 3831–3841

**Breitenbücher u. Rahm 2009**

BREITENBÜCHER, R. ; RAHM, H.: Zerstörungsfreie Bestimmung des Stahlfasergehalts und der Stahlfaserorientierung im Frisch- und Festbeton. In: *beton* 99 (2009), Nr. 3, S. 88–93

**DAfStb 2012**

DAFSTB: *Richtlinie Stahlfaserbeton, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton e. V. Stahlfaserbeton - Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 und DIN EN 13670 in Verbindung mit DIN 1045-3 - Teil 1: Bemessung und Konstruktion - Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Teil 3: Hinweise für die Ausführung*. 2012. Berlin : Beuth, 2012

**DAfStb 2015**

DAFSTB: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. Bd. 614: *Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie "Stahlfaserbeton"*. 1. Aufl. Berlin and Wien and Zürich : Beuth, 2015

**DBV 2001**

DBV: *DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton*. 2001

**DBV 2004**

DBV: *DBV Merkblatt Industrieböden aus Beton für Frei- und Hallenflächen*. 2004

**Demant u. a. 1998**

DEMANT, C. ; STREICHER-ABEL, B. ; WASZKEWITZ, P.: *Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1998

**DIN EN 14889-1:2006**

DIN EN 14889-1:2006: *Fasern für Beton - Teil 1: Stahlfasern - Begriffe, Festlegungen und Konformität*

*DUCON 2010*

DUCON: *DUCON: Prüfergebnisse von Zugversuchen an normal- und hochfestem Stahldraht mit einem Durchmesser von 1 mm.* 2010

*Erdem 2002*

ERDEM, E.: *Probabilistisch basierte Auslegung stahlfasermodifizierter Betonbauteile auf experimenteller Grundlage.* Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2002

*Falkner u. Grunert 2011*

FALKNER, H. ; GRUNERT, J.-P.: Faserbeton. In: *Beton-Kalender 2011.* Berlin : Ernst & Sohn, 2011, S. 1–18

*Ferrara u. a. 2011*

FERRARA, L. ; OZYURT, N. ; PRISCO, M.: High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites the role of casting-flow induced fibre orientation. In: *Materials and Structures* 44 (2011), Nr. 1, S. 109–128

*Freeman u. Shapira 1975*

FREEMAN, H. ; SHAPIRA, R.: Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve. In: *Communications of the ACM* 18 (1975), Nr. 7, S. 409–413

*Freytag 2014*

FREYTAG, B.: *UHPC im konstruktiven Ingenieurbau.* Graz, Technische Universität Graz, Habilitationsschrift, 2014

*Gettu 2005*

GETTU, R.: Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. In: *Materials and Structures* 38 (2005), Nr. 275, S. 31–37

*Ghoddousi u. a. 2010*

GHODDOUSI, P. ; AHMADI, S. ; SHARIFI, M.: Fiber Pullout Model for Aligned hooked-end Steel Fiber. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 37 (2010), Nr. 9, S. 1179–1188

*Gröger u. a. 2011*

GRÖGER, J. ; NEHLS, N. ; SILBEREISEN, R. ; TUE, N. V.: Einfluss der Einbau- und der Betontechnologie auf die Faserverteilung und -orientierung in Wänden aus Stahlfaserbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 1, S. 45–49

*Hadl u. Tue 2016*

HADL, P. ; TUE, N. V.: Einfluss der Faserzugabe auf die Streuung im Zugtragverhalten von Stahlfaserbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Nr. 5, S. 310–318

*Heese 2013*

HEESE, C.: *Simulation des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen Feinkornsystemen.* Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2013

*Heese u. a. 2012*

HEESE, C. ; BREIT, W. ; SCHULER, F. ; LATZ, A. ; NIEDZIELA, D.: Simulation of the

Flow and Form Filling Behavior of UHPC with Fibers. In: KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Hrsg.): *Concrete Structures for Sustainable Community - fib Symposium 2012 - Proceedings*. Stockholm, 2012, S. 535–538

Hertz Messtechnik GmbH 2008

HERTZ MESSTECHNIK GMBH: *Handbuch BSM 100*. Delmenhorst, 2008

Hilsdorf u. a. 1985

HILSDORF, H. K. ; BRAMESHUBER, W. ; KOTTAS, R.: *Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ‚Weiterentwicklung und Optimierung der Materialeigenschaften faserbewehrten Betons und Spritzfaserbetons als Stabilisierungselemente der Fels-sicherung‘*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Forschungsbericht, 1985

Holschemacher u. a. 2011a

HOLSCHEMACHER, K. ; DEHN, F. ; KLUG, Y.: Grundlagen des Faserbetons. In: *BetonKalender 2011* Bd. 2. Ernst & Sohn, 2011, S. 21–88

Holschemacher u. a. 2011b

HOLSCHEMACHER, K. ; DEHN, F. ; KLUG, Y.: Grundlagen des Faserbetons. In: BERGMEISTER, K. (Hrsg.) ; FINGERLOOS, F. (Hrsg.) ; WÖRNER, J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2011*. Berlin : Ernst & Sohn, 2011, S. 19–88

Illerhaus 2007

ILLERHAUS, B.: Eine einfache aber langsame Art die Orientierung von segmentierbaren Fasern in 3D Voxelbildern zu ermitteln. In: *DGZfP-Berichtsband BB104-CD* (2007)

ITWM 2016

ITWM: *ToolIP: Tool for Image Processing*. Kaiserslautern, 2016

Kar u. Pal 1972

KAR, J. N. ; PAL, A. K.: Strength of fiber-reinforced concrete. In: *Journal of Structural Division, Proceedings of ASCE ST5* (1972), S. 1053–1068

Korb 2010

KORB, S.: *Untersuchungen zum Zugtragverhalten hochduktiler Faserbetone mit zusätzlicher Textilbewehrung*, Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2010

Krause u. a. 2010

KRAUSE, M. ; HAUSHERR, J. M. ; BURGETH, B. ; HERRMANN, C. ; KRENKEL, W.: Determination of the fibre orientation in composites using the structure tensor and local X-ray transform. In: *Journal of Materials Science* 45 (2010), Nr. 4, S. 888–896

Krenchel 1964

KRENCHER, H.: *Fibre reinforcement: Theoretical and practical investigations of the elasticity and strenght of fibre-reinforced materials*. Copenhagen, Technical University of Denmark, Dissertation, 1964

Leung u. Li 1992

LEUNG, C. K. ; LI, V. C.: Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 40 (1992), Nr. 6, S. 1333–1362

*Leutbecher 2007*

LEUTBECHER, T.: *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC)*. Kassel, Universität Kassel, Dissertation, 2007

*Lin 1999*

LIN, Y.-z.: *Tragverhalten von Stahlfaserbeton: DAFStb-Heft 494*. Berlin : Beuth, 1999

*Lingemann u. Zilch 2013*

LINGEMANN, J. ; ZILCH, K.: Einfluss der Bauteilgröße auf das Tragverhalten von Stahlfaserbeton - theoretisches Modell und Verifizierung am Bauteil. In: *Bauingenieur* 88 (2013), S. 518–524

*Luhmann 2000*

LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Heidelberg : Wichmann, 2000

*Maidl 1991*

MAIDL, B.: *Stahlfaserbeton*. Berlin : Ernst & Sohn, 1991

*Markovic 2006*

MARKOVIC, I.: *High-performance hybrid-fibre concrete - development and utilisation*. Delft, TU Delft, Dissertation, 2006

*Martinie u. a. 2010*

MARTINIE, L. ; ROSSI, P. ; ROUSSEL, N.: Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. In: *Cement and Concrete Research* 40 (2010), Nr. 2, S. 226–234

*Mathews u. Lub 1983*

MATHEWS, M. S. ; LUB, K. B.: *Steel Fibre Reinforced Concrete, ist definition, development, behaviour and uses*. Eindhoven : Technische Hogeschool Eindhoven, Dissertation, 1983

*Müller u. Wiens 2016*

MÜLLER, H. S. ; WIENS, U.: Beton - Faserbeton. In: BERGMEISTER, K. (Hrsg.) ; FINGERLOOS, F. (Hrsg.) ; WÖRNER, J. D. (Hrsg.): *Beton Kalender 2016*. Berlin : Ernst & Sohn, 2016 (Beton-Kalender), S. 124–141

*Naaman 2004*

NAAMAN, A. E.: Evaluation of Steel Fibres for Applications in Struktural Concrete. In: *Fibre-Reinforced Concrete*. Italien : RILEM Publications S.A.R.L., 2004, S. 389–400

*Naaman u. a. 1991*

NAAMAN, A. E. ; NAMMUR, G. G. ; ALWAN, J. M. ; NAJM, H. S.: Fiber Pullout and Bond Slip. I: Analytical Study. In: *Journal of Structural Engineering* 117 (1991), Nr. 9, S. 2769–2790

*Nezhentseva u. a. 2013*

NEZHENTSEVA, A. ; SORENSEN, E. V. ; ANDERSON, L. V. ; SCHULER, F.: *Distribution and Orientation of Steel Fibres in UHPFRC*. Aalborg, 2013 (DCE Technicla Report No. 151)

*Ohser u. Mücklich 2000*

OHSER, J. ; MÜCKLICH, F.: *Statistical analysis of microstructures in materials science*. Chichester [England] and New York : John Wiley, 2000 (Statistics in practice)

*Ohser u. Schladitz 2009*

OHSER, J. ; SCHLADITZ, K.: *3D images of materials structures: Processing and analysis*. Weinheim : Wiley-VCH, 2009

*Parimi u. Rao 1971*

PARIMI, S. ; RAO, S.: Effectiveness of random fibres in fibre reinforced concrete. In: *Proceedings International Conference of Mechanical Behaviour of Materials*. 1971, S. 176–186

*Parra-Denis u. a. 2008*

PARRA-DENIS, E. ; BARAT, C. ; JEULIN, D. ; DUCOTTET, C.: Complex Shape Characterization by Statistical Analysis: Application to Aluminium Alloys. In: *Materials Characterization* 59 (2008), Nr. 3, S. 338–343

*Pfyl 2003*

PFYL, T.: *Tragverhalten von Stahlfaserbeton*. Zürich, Eidgenössische Universität Zürich, Dissertation, 2003

*Pittino u. a. 2011*

PITTINO, G. ; GEIER, G. ; FRITZ, L. ; HADWIGER, M. ; ROSC, J. ; PABEL, T.: Computertomografische Untersuchung von Stahlfaserspritzbeton mit mehrdimensionalen Transferfunktionen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 6, S. 364–370

*Robb u. a. 2007*

ROBB, K. ; WIRJADI, O. ; SCHLADITZ, K.: Fiber orientation estimation from 3D image data. Practical algorithms, visualization, and interpretation. In: *IEEE: 7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, HIS 2007. Proceedings : 17-19 Sept, 2007*, S. 320–325

*Robins u. a. 2002*

ROBINS, P. ; AUSTIN, S. ; JONES, P.: Pull-out behaviour of hooked steel fibres. In: *Materials and Structures* 35 (2002), Nr. 7, S. 434–442

*Romualdi u. Mandel 1964*

ROMUALDI, J. P. ; MANDEL, J. A.: Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short length of wire reinforcement. In: *Journal of ACI* (1964), S. 657–674

*Rosenbusch 2004*

ROSENBUSCH, J.: *Zur Querkrafttragfähigkeit von Balken aus stahlfaserverstärktem Stahlbeton: DAFStb-Heft 550*. Berlin : Beuth, 2004

*Rossi 1994*

ROSSI, P.: Steel fiber reinforced concrete (SFRC): an example of french research. In: *ACI Materials Journal* 91 (1994), Nr. 3, S. 273–279

*Sandau u. Ohser 2007*

SANDAU, K. ; OHSER, J.: The chord length transform and the segmentation of cross-

sing fibres. In: *Journal of microscopy* 226 (2007), S. 43–53

**Schladitz u. Godehardt 2012**

SCHLADITZ, K. ; GODEHARDT, M.: *MAVI: Modular Algorithms for Volume Images*. Kaiserslautern, 2012

**Schladitz u. Godehardt 2016**

SCHLADITZ, K. ; GODEHARDT, M.: *MAVI: Modular Algorithms for Volume Images*. Kaiserslautern, 2016

**Schnell u. a. 2012**

SCHNELL, J. ; KURZ, W. ; BREIT, W. ; CASTORPH, M.: *Mikroverbund-Leichtbauweise unter Verwendung von ultrahochfesten Betonen*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Bericht, 2012

**Schnell u. a. 2010**

SCHNELL, J. ; SCHLADITZ, K. ; SCHULER, F.: Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer - Tomographie. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010), Nr. 2, S. 72–77

**Schnütgen 1975**

SCHNÜTGEN, B.: Das Festigkeitsverhalten von mit Stahlfasern bewertem Beton unter Zugbeanspruchung. In: *Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen*. Bochum, 1975

**Schönlín 1988**

SCHÖNLIN, K.: Ermittlung der Orientierung, Menge und Verteilung der Fasern in faserbewertem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 83 (1988), Nr. 6, S. 168–171

**Schuler 2010**

SCHULER, F.: Möglichkeiten des Einsatzes der Computer-Tomographie zur Untersuchung von Faserbetonen. In: BREIT, W. (Hrsg.) ; KURZ, W. (Hrsg.) ; SCHNELL, J. (Hrsg.) ; KOHLMAYER, C. (Hrsg.): *Doktorandensymposium 2010, 51. Forschungskolloquium des DAfStb, 11. und 12. November 2010 an der TU Kaiserslautern* Bd. Band 2. Kaiserslautern, 2010, S. 577–587

**Schuler u. a. 2017**

SCHULER, F. ; BREIT, W. ; SCHNELL, J. ; SCHLADITZ, K.: Computertomografie - den Fasern auf der Spur. In: *Bautechnik* 94 (2017), Nr. 10, S. 689–696

**Schuler u. Schladitz 2011**

SCHULER, F. ; SCHLADITZ, K.: Zur Untersuchung von stahlfaserverstärkten Betonen auf Basis der 3D-Computer-Tomographie. In: *1. Young Reseacher Symposium, Nachwuchsring des Landesforschungszentrums ,Center of Mathematical and Computational Modelling‘ CM<sup>2</sup>*, 2011, S. 72–77

**Schuler u. Sych 2009**

SCHULER, F. ; SYCH, T.: *Analyse der Faserorientierung in Betonen mit Hilfe der Computer-Tomographie*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl., 2009

**Soille 1998**

SOILLE, P.: *Morphologische Bildverarbeitung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1998

*Soroushian u. Bayasi 1991*

SOROUSHIAN, P. ; BAYASI, Z.: Fiber-type effect on the performance of steel fiber reinforced concrete. In: *ACI Materials Journal* 88 (1991), Nr. 2, S. 129–134

*Soroushian u. Lee 1990*

SOROUSHIAN, P. ; LEE, C.: Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete. In: *ACI Materials Journal* 87 (1990), Nr. 5, S. 433–439

*Spinnler u. a. 2010*

SPINNLER, K. ; WENZEL, T. ; OECKL, S. ; BEHRENDT, R. ; SCHMITT, P. ; SALAMON, M.: Technologien und Trends in der industriellen Röntgentechnik - Röntgen und CT. In: *Quality Engineering* 2010 (2010), Nr. 6, S. 27–31

*Stamm 2001*

STAMM, M.: *Fortschrittberichte VDI*. Bd. 168: *Einfluß von Stahlfasern auf die Schädigungsevolution von Beton in Abhängigkeit von der Dehnrate*: Zugl.: Univ. Bochum, Dissertation. Düsseldorf : VDI-Verl. and VDI-Verl., 2001

*Steinbrecher 1993*

STEINBRECHER, R.: *Bildverarbeitung in der Praxis*. München : Oldenbourg, 1993

*Stoyan u. a. 1995*

STOYAN, D. ; KENDALL, W. S. ; MECKE, J.: *Stochastic geometry and its applications*. 2nd ed. Chichester and New York : Wiley, 1995 (Wiley series in probability and statistics. Applied probability and statistics)

*Strack 2007*

STRACK, M.: *Modellbildung zum rissbreitenabhängigen Tragverhalten von Stahlfaserbeton unter Biegebeanspruchung*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2007

*Stroeven 1978*

STROEVEN, P.: Morphometry of fibre reinforced cementitious materials: Part 1: Efficiency and spacing in idealized structures, Part 2: Inhomogeneity. In: *Materiaux et Constructions* 11 (1978), S. 31–38

*Suuronen u. a. 2013*

SUURONEN, J.-P. ; KALLONEN, A. ; EIK, M. ; PUTTONEN, J. ; SERIMAA, R. ; HERRMANN, H.: Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography. In: *Journal of Materials Science* 48 (2013), Nr. 3, S. 1358–1367

*Tue u. a. 2007*

TUE, N. V. ; HENZE, S. ; KÜCHLER, M. ; SCHENK, G. ; WILLE, K.: Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -orientierung in stahlfaserverstärktem UHFB. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), Nr. 10, S. 674–680

*Vecchio u. a. 2010*

VECCHIO, I. ; HENKA, M. J. ; SCHLADITZ, K.: Partikelcharakterisierung in 3D. In: KASTNER, J. (Hrsg.): *Industrielle Computertomografie Tagung // Proceedings / Industrielle Computertomografie-Tagung*. Aachen : Shaker, 2010, S. 59–63



*Vecchio u. a. 2011*

VECCHIO, I. ; SCHLADITZ, K. ; GODEHARDT, M. ; HENEKA, M. J.: Geometric characterization of particles in 3d with an application to technical cleanliness. In: *Berichte des Fraunhofer ITWM*. 2011

*Wadell 1935*

WADELL, H.: Volume, shape, and roundness of quartz particles. In: *journal of geology* 43 (1935), Nr. 3, S. 250–280

*Weidemann u. a. 2007*

WEIDEMANN, G. ; STADIE, R. ; GOEBBELS, J. ; HILLEMEIER, B.: Fibre reinforced autoclaved aerated concrete studied by computed tomography. In: *DIR 2007 - International Symposium on Digital industrial Radiology and Comuted Tomography*. Lyon and France, 2007

*Wichmann u. a. 2013*

WICHMANN, H.-J. ; HOLST, A. ; BUDELMANN, H.: Ein praxisgerechtes Messverfahren zur Bestimmung der Fasermenge und -orientierung im Stahlfaserbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 12, S. 822–834

*Wichmann u. a. 1999*

WICHMANN, H.-J. ; NIEMANN, P. ; DROESE, S.: Messung des Stahlfasergehaltes auf elektromagnetischer Basis. In: *Forschungsarbeiten aus dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Universität Braunschweig*. Braunschweig, 1999

*Wirjadi u. a. 2016*

WIRJADI, O. ; SCHLADITZ, K. ; EASWARAN, P. ; OHSER, J.: Estimating Fibre Direction Distributions of Reinforced Composites from Tomographic Images. In: *Image Analysis and Stereology* 35 (2016), Nr. 3, S. 167–179

*Yaziki u. a. 2007*

YAZIKI, S. ; INAN, G. ; TABAK, V.: Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. In: *Construction and Building Materials* 21 (2007), Nr. 6, S. 1250–1253

*Zingg 1935*

ZINGG, T.: *Beitrag zur Schotteranalyse*. Zürich, ETH Zürich, Dissertation, 1935



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
2.1	Last-Verformungsverhalten von Beton, vereinfachte Darstellung nach <i>DAfStb 2012</i> . . . . .	5
2.2	Last-Verformungsverhalten von Stahlbeton, vereinfachte Darstellung nach <i>DAfStb 2012</i> . . . . .	5
2.3	Last-Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton (entfestigendes Verhalten), vereinfachte Darstellung nach <i>DAfStb 2012</i> . . . . .	6
2.4	Last-Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton (verfestigendes Verhalten), vereinfachte Darstellung nach <i>DAfStb 2012</i> . . . . .	6
2.5	Stahlfaserformen gemäß <i>DAfStb 2015</i> . . . . .	6
2.6	Verhalten eines Stahlfaserbetons unter Biegezugbeanspruchung . . . .	7
2.7	Auszugverhalten von Stahlfasern mit Endaufbiegungen (nach <i>Ghoddoussi u. a. 2010</i> ) . . . . .	9
2.8	Einfluss unterschiedlicher Fasergeometrien auf das Tragverhalten (Biegebalken) (nach <i>Strack 2007</i> ) . . . . .	11
2.9	Visualisierter Rissbereich, kleiner Faserorientierungsbeiwert . . . . .	13
2.10	Visualisierter Rissbereich, hoher Faserorientierungsbeiwert . . . . .	13
2.11	Ausrichtung von Fasern in Beton . . . . .	14
2.12	Einfluss des Größtkorns auf die Beweglichkeit der Fasern nach <i>Mathews u. Lub 1983</i> . . . . .	15
2.13	Abhängigkeit der Faserorientierung von der Bauteilhöhe (vgl. <i>Rosenbusch 2004</i> ) . . . . .	17
2.14	Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes nach <i>Lin 1999</i> . . . . .	18
2.15	Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes nach <i>Markovic 2006</i> . . . . .	18
2.16	Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes nach <i>Pfyll 2003</i> . . . . .	19
2.17	Darstellung der Ersatzellipsen in der Schnittflächenaufnahme (vgl. <i>Tue u. a. 2007</i> ) . . . . .	23
2.18	Funktionsprinzip der induktiven Messung (vgl. <i>Hertz Messtechnik GmbH 2008</i> ) . . . . .	24
2.19	Schematische Darstellung des Wendebrettes (vgl. <i>Hertz Messtechnik GmbH 2008</i> ) . . . . .	25
2.20	Systematische Darstellung eines Standard-CT-Systems . . . . .	26
3.1	Für die Ausrichtung der Probe zur Verfügung stehende Verfahrensschritte der Manipulationseinheit . . . . .	29
3.2	Systematische Darstellung der geometrischen Vergrößerung . . . . .	30

3.3	Visualisierung eines Druck-Schublagers, Bildausschnitt (vgl. <i>Schuler u. Schladitz 2011</i> ) . . . . .	31
4.1	Funktionsweise eines linearen Filters (vgl. <i>Demant u. a. 1998</i> ) . . . . .	36
4.2	Systemdarstellung der Zusammenhänge der morphologischen Operationen Erosion und Dilatation nach <i>Luhmann 2000</i> . . . . .	37
4.3	Auswirkung des Opening-Filters (Trennen und Entfernen) . . . . .	37
4.4	Auswirkung der Closing-Filters (Schließen und Verbinden) . . . . .	37
4.5	Zingg-Diagramm mit dem Schwellwert 2/3 (vgl. <i>Vecchio u. a. 2011</i> ) . . . . .	40
4.6	Objektformen die zu Fehlern in der Klassifizierung führen (vgl. <i>Vecchio u. a. 2011</i> ) . . . . .	40
4.7	Beispielhafte Darstellung aus CT-Aufnahmen generierter Schnittbilder (slices) . . . . .	43
4.8	Bearbeitungsdialogs „Binarisierung“ des Analyseprogramms . . . . .	44
4.9	Segmentierungsergebnis eines unbearbeiteten Bildes am Beispiel eines Bildausschnitts . . . . .	45
4.10	Vergleich zwischen Originalbild und Filterergebnis . . . . .	46
4.11	Histogramm der Grauwertverteilung (logarithmische Darstellung) . . . . .	46
4.12	Segmentierungsergebnis eines mit Filtern bearbeiteten Bildes . . . . .	47
4.13	Anwendung des Objektfilters zur Entfernung von störenden Einschlüssen . . . . .	48
4.14	Beispielhafte Darstellung der Visualisierungsmöglichkeiten . . . . .	49
5.1	Visualisierungen des Segmentierungsergebnisses der Probe 1 . . . . .	54
5.2	Ausschnitt aus einer Schnittebene des Original-Grauwertbildes (Probe 1) . . . . .	55
5.3	Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses und des Original-Grauwertbildes . . . . .	55
5.4	Visualisierung des Fasersystems der Probe 2 . . . . .	57
5.5	Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses . . . . .	57
5.6	Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses . . . . .	59
5.7	Visualisierungen des Segmentierungsergebnisses der Probe 3 . . . . .	60
5.8	Gegenüberstellung des Segmentierungsergebnisses . . . . .	62
5.9	Visualisierungen des Segmentierungsergebnisses der Probe 4 . . . . .	62
5.10	Visualisierungen der Teilvolumen aus Probe 4 . . . . .	64
5.11	Lage der untersuchten Teilvolumen . . . . .	64
5.12	Einfluss des Schwellwertes auf das Segmentierungsergebnis . . . . .	66
5.13	Visualisierung des Segmentierungsergebnisses, Mikrobewehrung . . . . .	67
6.1	Schematischer Aufbau eines 3-Punkt Biegezugversuches, Maße in mm . . . . .	71
6.2	Aus der Herstellung der Probekörper resultierende Schnittflächen am Beispiel der Teilprobe „II“ . . . . .	71
6.3	Herstellungstoleranzen der verwendeten Stahlfaser Dramix RC 80/60 G . . . . .	72
6.4	Visualisierung des Binarisierungsergebnisses bei einer Unterbewertung der innen liegenden Fasern . . . . .	73
6.5	Visualisierung des Binarisierungsergebnisses bei einer Überbewertung der im Eckbereich befindlichen Fasern . . . . .	73
6.6	Darstellung des ungleichmäßigen Grauwertverlaufes am Beispiel eines Schnittbildes, 16-Bit Darstellung . . . . .	74

6.7 Ergebnis der Grauwertanpassung am Beispiel eines Schnittbildes, 12-Bit Darstellung . . . . .	74
6.8 Segmentierungsergebnis vor und nach der Anwendung des Filters „fill holes“ zur Reduzierung von lokalen Minima . . . . .	75
6.9 Nachbarschaftssysteme in 3D; direkte Nachbarn (grün) des zentralen Pixels (blau) . . . . .	75
6.10 Schematische Darstellung der Objektsegmentierung . . . . .	78
6.11 Beispielhafte Darstellung von segmentierten Einzelfasern anhand von 3D-Visualisierungen . . . . .	79
6.12 Visualisierung einer beim Mischen und/oder Einbringen des Betons stark verformten Faser (Objekt 145) . . . . .	80
6.13 Visualisierung einer Faser mit einem verformten Teilstück im Bereich des Risses (Objekt 70) . . . . .	80
6.14 Beispielhafte Visualisierungen einer Objektschar (Label 68) aus zwei Perspektiven . . . . .	81
6.15 Beispielhafte Visualisierungen einer Objektschar (Label 89) aus zwei Perspektiven . . . . .	81
6.16 Darstellung einer boundig box (unmaßstäbliche Darstellung der Fasern)	84
6.17 Darstellung der elongation-Länge (unmaßstäbliche Darstellung der Fasern) . . . . .	85
6.18 Darstellung des maximum feret diameter (unmaßstäbliche Darstellung der Fasern) . . . . .	86
6.19 Darstellung der „maximum local thickness“ am Beispiel einer einzelnen geraden Faser (Schnittfläche) . . . . .	86
6.20 Ablaufschema und Ergebnisse der Vorfilters zur Separierung der drei Objektklassen . . . . .	87
6.21 Grafische Darstellung der Wasserscheidentransformation . . . . .	89
6.22 Ausschnitt aus dem Datensatz des zerlegten Objekts 141 . . . . .	89
6.23 Darstellung der Schnittebenen an einem beispielhaften Volumenausschnitt im Bereich sich berührender Fasern . . . . .	90
6.24 Ausschnitt aus dem Datensatz des zerlegten Objektes 1 . . . . .	91
6.25 3D-Visualisierung aller im Probekörpervolumen vorhandenen Fasern .	93
6.26 3D-Visualisierung der 44 rissquerenden Fasern . . . . .	93
6.27 Darstellung unterschiedlicher Formfaktoren . . . . .	98
6.28 Darstellung der Einbindelängen einer Faser in die Rissflanken . . . . .	99
6.29 beispielhafte Darstellung einer Verformung eines Faserendes . . . . .	100
6.30 Lastzelle zur Beobachtung des Faserauszugverhaltens . . . . .	101



# Tabellenverzeichnis

2.1 Einzelprüfergebnisse zweier Proben; Fasermenge, Faserorientierung für die Achsrichtungen (Vorzugsrichtungen), Nachrissbiegezugfestigkeiten L1 und L2 . . . . .	13
2.2 Übersicht von Faserorientierungsbeiwerten aus der Literatur . . . . .	20
2.3 Übersicht von Faserorientierungsbeiwerten aus der Literatur, Fortführung der Tabelle 2.2 . . . . .	21
2.4 Übersicht der wichtigsten Messverfahren zur Bestimmung der Stahlfaserorientierung und -menge nach <i>Wichmann u. a. 2013</i> . . . . .	23
5.1 Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 1 . . . . .	56
5.2 Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 2 . . . . .	59
5.3 Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 3 . . . . .	61
5.4 Probenbeschreibung und Zusammenstellung der wichtigsten Analyseergebnisse, Probe 4 . . . . .	63
5.5 Einfluss eines veränderten Schwellwert . . . . .	66
6.1 Zusammenfassung der visuellen Untersuchung der Objekte, erkannte Fasern . . . . .	79
6.2 Zusammenfassung der visuellen Untersuchung der Objekte, erkannte Einschlüsse . . . . .	80
6.3 Zusammenfassung der visuellen Untersuchung der Objekte, erkannte Objektschare . . . . .	82
6.4 Übersicht aller im untersuchten Probekörper vollständig dargestellten Fasern mit Angabe der mittels Partikelanalyse ermittelten Parametern, Sortierung nach Form . . . . .	83
6.5 Zusammenfassung der ermittelten faserspezifischen Parameter der rissquerenden Fasern . . . . .	95
A.1 Betonzusammensetzung . . . . .	123
A.2 Ergebnisse der Frischbetonprüfung . . . . .	124
A.3 Ergebnisse der Festbetonprüfung, Beton ohne Stahlfasern . . . . .	124
A.4 Ergebnisse der Festbetonprüfung, Beton mit Stahlfasern . . . . .	124
B.1 Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 1/5 . . . . .	126
B.2 Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 2/5 . . . . .	127
B.3 Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 3/5 . . . . .	128
B.4 Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 4/5 . . . . .	129

B.5	Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 5/5 . . . . .	130
B.6	Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Einschlüsse, Tabelle 1/2 . . .	131
B.7	Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Einschlüsse, Tabelle 2/2 . . .	132
B.8	Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Objektscharen . . . . .	133
B.9	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 1 - 12 .	134
B.10	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 13 - 24	135
B.11	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 25 - 36	136
B.12	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 37 - 48	137
B.13	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 49 - 60	138
B.14	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 61 - 72	139
B.15	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 73 - 84	140
B.16	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 85 - 96	141
B.17	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 97 - 108	142
B.18	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 109 - 120	143
B.19	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 121 - 132	144
B.20	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 133 - 144	145
B.21	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 145 - 156	146
B.22	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 157 - 168	147
B.23	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 169 - 180	148
B.24	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 181 - 192	149
B.25	Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 193 - 203	150



## A      Angaben zur verwendeten Betonmischung und Herstellung der Probekörper

Im Labor des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern wurden Probekörper für drei Versuchsserien mit unterschiedlichem Stahlfasergehalt ( $30 \text{ kg/m}^3$ ,  $45 \text{ kg/m}^3$  und  $60 \text{ kg/m}^3$ ) hergestellt. Als Bindemittel kam ein Portlandzement CEM I 42,5 N der Fa. Dyckerhoff/Göllheim zum Einsatz. Als Gesteinskörnung wurde Rheinsand bzw. Rheinkies mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Grundsätzlich müssen die Stahlfasern als Volumenbestandteil bei der Stoffraumrechnung berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Mischungsbeziehung der Stoffraum ohne Stahlfasern bestimmt, damit sollte eine gleichbleibende Basismischung für alle Versuchsserien sicher gestellt werden. Bei den zugegebenen Stahlfasern handelte es sich um kaltgezogene Stahldrahtfasern des Typs Dramix R RC 80/60 BN mit aufgekröpften Enden und einer Mindestzugfestigkeit von  $1050 \text{ N/mm}^2$ . Diese Fasern weisen bei einer Länge von 60 mm und einem Durchmesser von 0,75 mm einen l/d-Verhältnisswert von 80 auf. Auf die Zugabe von weiteren Zusatzstoffen und -mitteln wurde verzichtet. Die Betonzusammensetzung ist in Tabelle A.1 aufgeführt.

Tab. A.1:    Betonzusammensetzung

Versuch	w/z – Wert	Zement [kg/m³]	Wasser [kg/m³]	Gesteinskörnung [kg/m³]			Stahlfaser [kg/m³]
				Korngruppe			
				0/2	2/8	8/16	
1							30
2	0,56	345	194	616	616	535	45
3							60

Um ein Absetzen der beigemischten Stahlfasern während des Verdichtungsvorgangs zu verhindern, wurde ein steifer Konsistenzbereich gewählt. Die Ergebnisse der Frischbetonprüfung vor und nach Zugabe der Stahlfasern können Tabelle A.2 entnommen werden.

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls wurden sowohl vor als auch nach der Zugabe der Stahlfasern Probekörper hergestellt. Die in den Tabellen A.3 und A.4 dargestellten Kennwerte ergaben sich aus dem Mittelwert von jeweils drei Versuchen.

Tab. A.2: Ergebnisse der Frischbetonprüfung

Versuch	Beton			Stahlfaserbeton		
	Ausbreitmaß	LP-Gehalt	Rohdichte	Ausbreitmaß	LP-Gehalt	Rohdichte
	$f$ [mm]	$A_c$ [Vol.-%]	$D$ [kg/m³]	$f$ [mm]	$A_c$ [Vol.-%]	$D$ [kg/m³]
1	328	2,0		290	2,4	
2	345	1,5	2,35	305	1,8	2,35
3	350	1,3		295	1,6	

Tab. A.3: Ergebnisse der Festbetonprüfung, Beton ohne Stahlfasern

Versuch	Druckfestigkeit <sup>1)</sup>		Elastizitätsmodul <sup>1)</sup>	Rohdichte
	$f_{c,cube}$ [N/mm²]	$f_{c,zylinder}$ [N/mm²]	$E_{cm}$ [N/mm²]	$D$ [kg/m³]
1	52,6	46,1	28.100	2,34
2	53,3	45,7	28.500	2,35
3	48,5	40,5	27.700	2,35

<sup>1)</sup> Prüfalter 28d

Tab. A.4: Ergebnisse der Festbetonprüfung, Beton mit Stahlfasern

Versuch	Druckfestigkeit		Elastizitätsmodul	Rohdichte
	$f_{c,cube}$ [N/mm²]	$f_{c,zylinder}$ [N/mm²] <sup>1)</sup>	$E_{cm}$ [N/mm²] <sup>1)</sup>	$D$ [kg/m³]
1	53,8	54,9	30.800	2,34
2	58,6	58,6	30.300	2,37
3	51,6	53,6	30.300	2,35

<sup>1)</sup> Prüfung am Tag der Nachrissbiegezugprüfung, Prüfalter ca. 56d

## **B      Untersuchung rissquerender Fasern auf Basis der Objektsegmentierung**

### **B.1      Visuelle Überprüfung der gelabelten Objekte**

#### **B.1.1      Einzelfasern**

Tab. B.1: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 1/5

Objektnummer	Form		Begrenzungsfläche				Bemerkung
	gerade	gebogen	a	b1	b2	c	
2	1					1	
3	1					1	
4	1				1	1	
5	1					1	
6	1					1	
7						1	sehr klein
12		1			1	1	
13	1			1			
14	1			1			
15	1			1			
16	1			1			
17	1			1			
19	1			1			
20	1		1				
22	1				1		
23	1			1			
28	1		1				
29	1			1			
30	1			1			
31	1			1			
34		1					
35		1			1	1	
36	1			1			
37		1	1				
38	1			1		1	
39	1				1		
40		1	1		1		doppelter Randschnitt
43	1		1				
44	1				1		
45	1			1			

Tab. B.2: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 2/5

Objektnummer	Form		Begrenzungsfläche				Bemerkung
	gerade	gebogen	a	b1	b2	c	
46	1				1		
47			1				Nur Endhaken im Körper
48					1		Nur Endhaken im Körper
49	1		1				
50	1			1			
51	1				1		
52		1			1		
53				1			Nur Endhaken im Körper
54		1		1		1	klein und stark gebogen
55		1				1	
57		1			1		stark gebogen
61	1			1			
62		1		1			leicht gebogen
64	1			1		1	
65	1			1			
66	1				1		
69	1				1		
70	1						
71	1			1			
72	1				1		
74	1				1		
75	1				1		
76		1			1		Nur Endhaken im Körper
77	1				1		
78	1				1		
79	1				1		
80	1		1				
81		1	1				
82	1			1			
83	1			1			
84	1						
85	1				1		

Tab. B.3: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 3/5

Objektnummer	Form		Begrenzungsfläche				Bemerkung
	gerade	gebogen	a	b1	b2	c	
86	1		1				
87	1						
88		1			1		
89		1			1		stark gebogen
90	1			1			
91	1		1				
92	1						
93		1		1			leicht gebogen
94	1				1		
97		1		1			leicht gebogen
99	1				1		
100		1		1			
101	1			1			
103		1	1				
105	1			1			
106	1			1			
107	1		1				
108	1			1			
109		1			1		leicht gebogen
110	1		1	1			
111	1			1			
113	1						
114	1			1			
116	1			1			
117	1						
118	1				1		
119	1						
121	1				1		
123	1						
124	1			1			
125		1	1				minimal gebogen
127		1			1		

Tab. B.4: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 4/5

Objektnummer	Form		Begrenzungsfläche				Bemerkung
	gerade	gebogen	a	b1	b2	c	
128		1					
129	1				1		
132		1					
134	1				1		
135		1	1				leicht gebogen
136	1				1		
137		1			1		leicht gebogen
138	1				1		
140	1			1			
142	1				1		
143	1			1		1	
144	1				1		
145		1					stark gebogen
146	1			1			
147	1				1		
148		1				1	
150	1			1		1	
151	1		1				
152	1			1			
153		1					stark gebogen
154	1			1			
155	1		1	1			
156	1				1		
159		1					stark gebogen
160	1		1		1		
161		1			1		
162	1				1		
163	1			1			
166	1				1		
167	1			1			
168	1		1	1			
169	1				1		

Tab. B.5: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Fasern, Tabelle 5/5

Objektnummer	Form		Begrenzungsfläche				Bemerkung
	gerade	gebogen	a	b1	b2	c	
171		1	1				
173	1			1			
174	1				1		
175		1			1		leicht gebogen
176	1				1		
177	1			1			
178	1			1			
179	1				1		leicht gebogen
180		1			1		
181	1				1		
182		1			1		
183	1				1	1	
184	1			1			
186	1				1	1	
187	1			1			
191	1				1	1	
192		1			1		leicht gebogen
193	1				1		
195	1			1		1	
196	1				1	1	
197					1		Endstück einer Faser
198	1					1	



## B.1.2 Einschlüsse

Tab. B.6: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Einschlüsse, Tabelle 1/2

Objektnummer	Form		Begrenzungsflächen				Bemerkung
	wolkig	zylindrisch	a	b1	b2	c	
8		1		1		1	
9	1					1	
11		1				1	
24	1						
27	1						
32	1						
33		1					
42		1		1			
56	1						
59		1				1	
63		1			1		
73		1			1		
96		1	1	1			
102	1		1				
104		1		1			
112		1					
120		1					
122	1						
130		1			1		
133		1		1			
139		1	1				
157		1			1		
165		1			1		
172		1			1		
185		1					
188		1		1			
189		1		1			
190		1		1			

Tab. B.7: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Einschlüsse, Tabelle 2/2

Objektnummer	Form		Begrenzungsflächen				Bemerkung
	wolkig	zylindrisch	a	b1	b2	c	
194		1					
199		1				1	
200		1				1	
201		1				1	
202		1				1	
203		1			1	1	

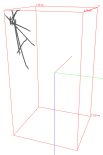
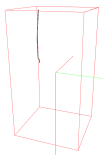




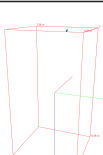
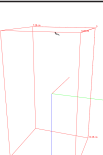



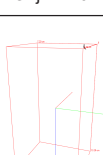
### B.1.3 Objektscharen

Tab. B.8: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Objektscharen

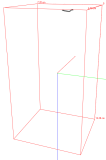
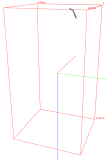
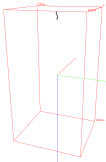

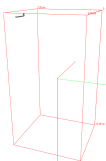
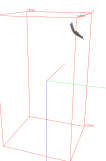
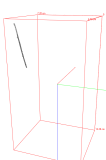
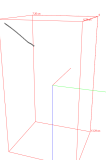
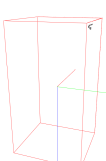
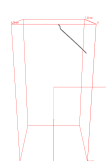
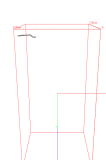
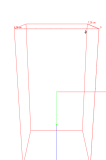
Objektnummer	Form		Anzahl der Objekte	Bemerkung
	räumlich	eben		
1		1	8	
10		1	2	Faser mit Einschluss
18		1	2	
21		1	2	2 Fasern parallel
25		1	3	
26		1	6	
41		1	3	
58		1	2	
60		1	2	
67		1	2	
68		1	8	
95		1	3	
98	1		3	recht klein
115		1	2	2 Fasern parallel
126		1	2	
131		1	2	
141	1		4	
149		1	2	
158		1	3	
164		1	2	
170		1	2	

## B.2 Ermittlung der Objekteigenschaften („particle features“)

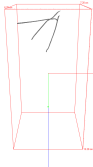
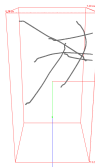
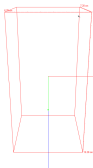
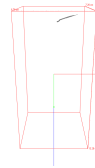
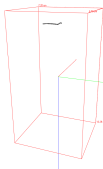
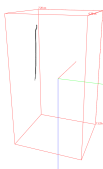
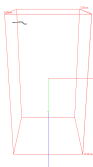
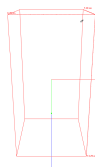
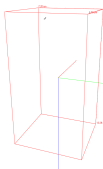
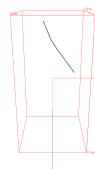
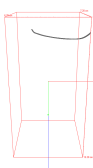
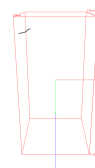
Tab. B.9: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 1 - 12

 <p>Objekt 1</p>	<p>Elongation 82.866,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 60.014,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,56 \cdot 10^{11} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 57.337,9 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (8 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 2</p>	<p>Elongation 50.624,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.690,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,41 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.684,56 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 3</p>	<p>Elongation 55.159,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 52.339,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,54 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 52.328,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 4</p>	<p>Elongation 16.531,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 16.045,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,33 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 697,432 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 16.019,8 <math>\mu\text{m}</math>  Zweifach geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegungen im Probekörper</p>
 <p>Objekt 5</p>	<p>Elongation 50.787,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.862,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,32 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.853,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 6</p>	<p>Elongation 17.778,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 16.673,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,96 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 16.702,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 7</p>	<p>Elongation 9.806,45 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 9.028,31 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,19 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 467,852 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 9.013,59 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 8</p>	<p>Elongation 5.947,35 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 5.492,14 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,67 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 5.466,54 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 9</p>	<p>Elongation 12.447,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 7.883,22 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,79 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 311,901 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 7.882,23 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 10</p>	<p>Elongation 43.422,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 34.325 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,53 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 34.314,9 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Faser mit Einschluss  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 11</p>	<p>Elongation 3.577,81 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.287,01 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,11 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 583,514 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.261,08 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 12</p>	<p>Elongation 13.443,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 11.783 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,36 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 11.783 <math>\mu\text{m}</math>  Zweifach geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegungen im Probekörper</p>

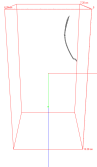
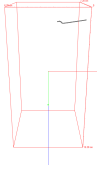
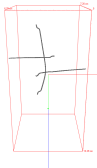
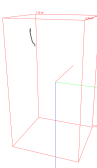

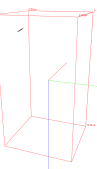
Tab. B.10: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 13 - 24

 <p>Objekt 13</p>	<p>Elongation 20.760,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 19.351,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,95 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 19.341,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 14</p>	<p>Elongation 34.637,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 31.587,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,08 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 583,514 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 31.584,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 15</p>	<p>Elongation 10.200,0 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 9.596,35 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,67 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 9.584,73 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 16</p>	<p>Elongation 41.437,0 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 38.265,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,75 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 38.264 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 17</p>	<p>Elongation 23.101,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 22.303,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,10 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 40.951,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 18</p>	<p>Elongation 54.773,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 44.801,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,39 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 44.576 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern ( 2 Fasern )  Zweidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 19</p>	<p>Elongation 42.484,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 40.951,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,33 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 40.951,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 20</p>	<p>Elongation 53.615,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 50.864,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,59 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 50.856,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 21</p>	<p>Elongation 34.256,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 28.362,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,82 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795.195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 28.330,3 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern ( 2 Fasern )  Zweidimensionale Anordnung</p>	 <p>Objekt 22</p>	<p>Elongation 45.793,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 44.092,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,32 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 44.086,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 23</p>	<p>Elongation 16.553,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 15.845,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,76 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 15.839,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 24</p>	<p>Elongation 6.528,99 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.814,42 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,17 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 381,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.384,67 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>

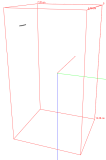
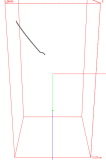
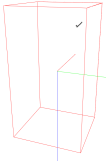
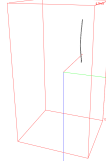
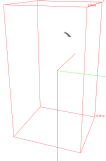
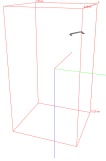
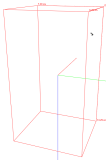
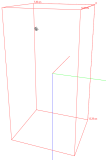
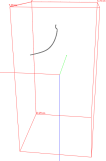
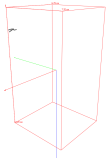

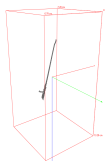
Tab. B.11: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 25 - 36

 <p>Objekt 25</p>	<p>Elongation 84.915,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.229,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,32 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.229,8 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (3 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 26</p>	<p>Elongation 128.419 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 85.472,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,40 \cdot 10^{11} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 73.173 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (6 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 27</p>	<p>Elongation 4.023,86 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 2.838,34 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,00 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 381,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 2.547,73 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 28</p>	<p>Elongation 27.001,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 25.258,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,07 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 25.251,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 29</p>	<p>Elongation 28.056,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 26.398 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>9,32 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 517,23 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 26.376,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 30</p>	<p>Elongation 50.395,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.318,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,31 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.325,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 31</p>	<p>Elongation 15.415,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 14.364,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,24 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 14.356,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 32</p>	<p>Elongation 6.023,79 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 4.486,12 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,36 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 381,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.469,21 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>
 <p>Objekt 33</p>	<p>Elongation 3.943,14 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.220,67 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,39 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 348,716 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.203,54 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 34</p>	<p>Elongation 67.819,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 63.851,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,05 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 63.851,1 <math>\mu\text{m}</math>  Ganze Einzelfaser  2 Endaufbiegungen  Gebogen</p>
 <p>Objekt 35</p>	<p>Elongation 53.843,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 48.399,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,79 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 48.286,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Gebogen</p>	 <p>Objekt 36</p>	<p>Elongation 12.736 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 12.042,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,64 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 12.035,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>

Tab. B.12: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 37 - 48

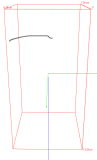
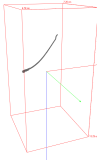
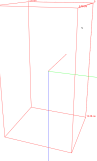
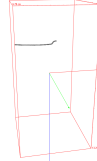
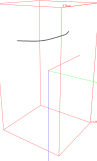
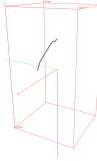
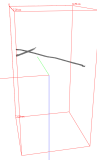

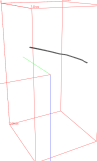
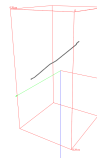
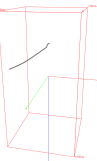
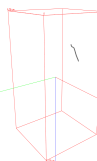
 <p>Objekt 37</p>	<p>Elongation 58.523 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 52.807,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,24 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 52.804,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 39</p>	<p>Elongation 49.329,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 44.210,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,37 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 44.170,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 41</p>	<p>Elongation 27.105,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 25.921,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,02 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 26.008,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 43</p>	<p>Elongation 85.486,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 69.302,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,87 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 59.032,7 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (3 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 45</p>	<p>Elongation 4.654,51 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.728,17 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,79 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 679,773 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.187,17 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>
 <p>Objekt 47</p>	<p>Elongation 25.702 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 23.973,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,22 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 23.966,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>

Tab. B.13: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 49 - 60

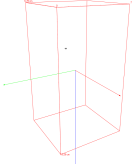
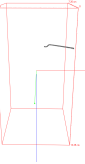


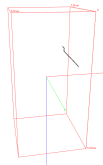

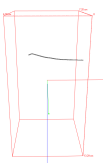
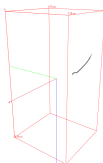
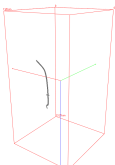
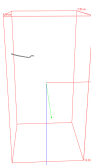
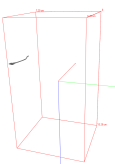
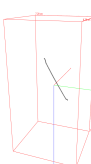
 <p>Objekt 49</p>	<p>Elongation 12.409,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 12.260,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,60 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 12.252,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Endstück der Faser  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 50</p>	<p>Elongation 44.375,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 42.135,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,02 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 42.129,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Endstück der Faser</p>
 <p>Objekt 51</p>	<p>Elongation 32.978,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 31.476,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,10 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 661,642 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 31.501,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 52</p>	<p>Elongation 56.615,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 51.051,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,58 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 51.051,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Leicht gebogen</p>
 <p>Objekt 53</p>	<p>Elongation 8.333,09 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 6.973,02 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,90 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 6.900,45 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Endstück der Faser  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 54</p>	<p>Elongation 18.310,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 15.055,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>8,78 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 14.927,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Endstück der Faser  Stark gebogen</p>
 <p>Objekt 55</p>	<p>Elongation 30.727,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 29.179,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,22 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 29.179,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Endstück der Faser</p>	 <p>Objekt 56</p>	<p>Elongation 7.691,86 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 5.595,78 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>8,75 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 270,114 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.425,92 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>
 <p>Objekt 57</p>	<p>Elongation 51.545,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 43.834,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,38 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 43.834,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Endstück der Faser  Stark gebogen</p>	 <p>Objekt 58</p>	<p>Elongation 16.724,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 10.125,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,09 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 9.896,86 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 59</p>	<p>Elongation 3.274,46 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.157,76 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,48 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 311,901 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.071,58 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 60</p>	<p>Elongation 58.268,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 55.664,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,34 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 55.470,8 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>



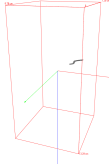
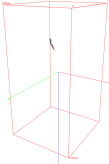
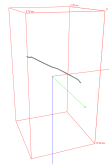
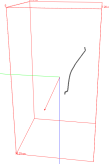
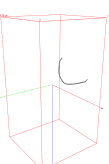
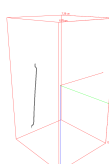
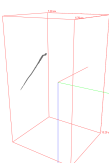
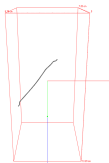

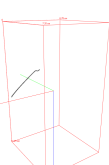

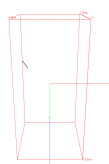
Tab. B.14: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 61 - 72

 <p>Objekt 61</p>	<p>Elongation 41.730,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 38.562,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,65 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 38.542,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 62</p>	<p>Elongation 52.566,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.521,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,31 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.521,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Leicht gebogen</p>
 <p>Objekt 63</p>	<p>Elongation 3.606,52 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 2.521,87 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,04 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 697,432 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 2.317,57 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 64</p>	<p>Elongation 36.420,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 34.108 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,59 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 33.933,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 65</p>	<p>Elongation 63.002 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 58.722,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,06 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 58.822,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 66</p>	<p>Elongation 37.723,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 35.668,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,72 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 35.668,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 67</p>	<p>Elongation 72.997,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 65.181,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,20 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 810,343 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 65.137,5 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 68</p>	<p>Elongation 155.794 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 106.281 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,27 \cdot 10^{11} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 101.906 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (9 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 69</p>	<p>Elongation 60.191,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 57.419,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,49 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 57.408,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 70</p>	<p>Elongation 68.582,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 62.122,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,07 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 65.140,9 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegungen im Probekörper</p>
 <p>Objekt 71</p>	<p>Elongation 50.284,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 46.865 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,28 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 46.816,9 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 72</p>	<p>Elongation 22.493,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 21.397,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,02 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 21.392,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>

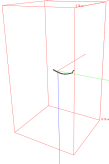

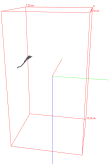
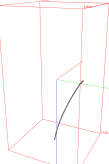
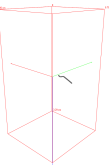
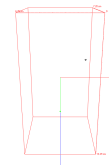
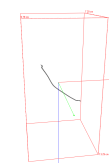
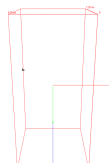

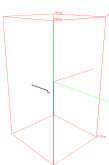
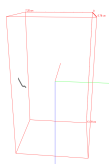

Tab. B.15: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 73 - 84

 <p>Objekt 73</p>	<p>Elongation 3.525,65 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 2.028,86 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,07 \cdot 10^5 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 381,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 1.919,2 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 74</p>	<p>Elongation 28.890,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 26.899,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,38 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 26.898,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 75</p>	<p>Elongation 16.001,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 14.418,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,11 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 14.397,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 76</p>	<p>Elongation 13.092,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 11.481,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,28 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 11.355,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Nur Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 77</p>	<p>Elongation 30.319,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 29.044,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,36 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 29.037 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 78</p>	<p>Elongation 38.028,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 36.437,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,70 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 36.429,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 79</p>	<p>Elongation 53.050,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 51.947 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,97 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 51.937 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 80</p>	<p>Elongation 29.458,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 27.558,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,34 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 27.553 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 81</p>	<p>Elongation 46.013,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 43.233,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,22 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 43.243,9 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 82</p>	<p>Elongation 23.856,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 22.704,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,03 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 22.688,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 83</p>	<p>Elongation 31.783 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 29.759,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,42 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 29.666,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 84</p>	<p>Elongation 67.152,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.408,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,04 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.384,6 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegungen im Probekörper</p>

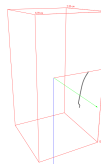

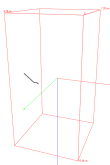
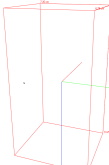
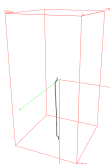
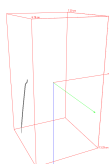
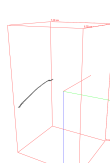
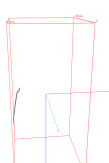
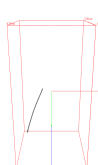
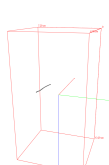
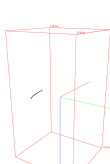
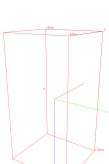
Tab. B.16: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 85 - 96

 <p>Objekt 85</p>	<p>Elongation 13.842,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 12.393,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,01 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 12.409,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 86</p>	<p>Elongation 17.397,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 16.087,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,06 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 15.926,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 87</p>	<p>Elongation 67.915,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 65.062,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,10 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 65.062,3 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 88</p>	<p>Elongation 67.580,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.628,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,13 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.533,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper  Gebogen</p>
 <p>Objekt 89</p>	<p>Elongation 65.775,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 48.786,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,85 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 48.786,9 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Stark gebogen</p>	 <p>Objekt 90</p>	<p>Elongation 66.642,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.776,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,13 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.776,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 91</p>	<p>Elongation 57.244,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 54.989,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,90 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 54.989,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 92</p>	<p>Elongation 67.629,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 65.270,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,05 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 65.270,9 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 93</p>	<p>Elongation 53.181 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 50.367,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,43 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 50.367,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Leicht gebogen</p>	 <p>Objekt 94</p>	<p>Elongation 44.770,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 42.451,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,44 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 42.336,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 95</p>	<p>Elongation 70.242,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 65.284,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,50 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 62.295,3 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (3 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 96</p>	<p>Elongation 12.707,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 11.811,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,49 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 348,716 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 11.805,8 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>

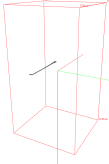
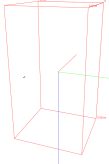
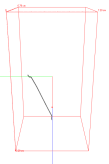
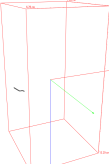
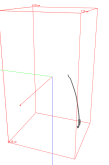

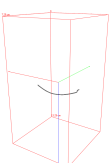
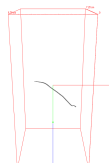
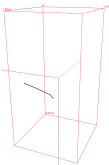
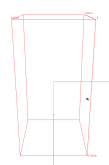
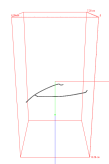
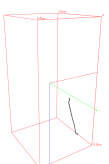
Tab. B.17: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 97 - 108

 <p>Objekt 97</p>	<p>Elongation 47.551,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 45.359,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,28 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 45.348,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  leicht gebogen</p>	 <p>Objekt 98</p>	<p>Elongation 29.859,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 16.372,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,30 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 810,343 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 13.612,8 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (3 Fasern)  Dreidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 99</p>	<p>Elongation 41.705,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 39.602 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,43 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 39.481,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 100</p>	<p>Elongation 64.959,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 57.535,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,26 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 57.510 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Gebogen</p>
 <p>Objekt 101</p>	<p>Elongation 15.627,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 14.595,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,74 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 14.498,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 102</p>	<p>Elongation 4.165,79 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 2.826,54 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,30 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 381,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 2.734,94 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 103</p>	<p>Elongation 67.998,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 62.049,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,97 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 62.049,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 104</p>	<p>Elongation 6.502,45 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 5.189,31 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,36 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.946,88 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Nur geringer Teil der Faser</p>
 <p>Objekt 105</p>	<p>Elongation 22.856,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 21.169,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,08 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 50.367,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 106</p>	<p>Elongation 25.667,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 24.476,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,18 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 24.469,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 107</p>	<p>Elongation 24.442,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 23.112,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,23 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 810,343 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 23.110,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 108</p>	<p>Elongation 11.369,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 10.786 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,91 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 10.782,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>

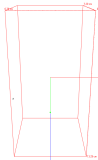
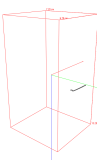
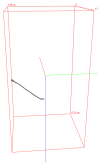
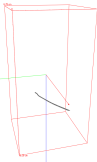
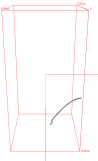
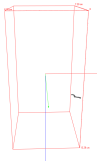

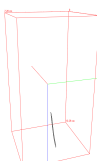
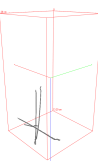

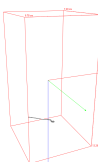
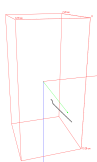
Tab. B.18: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 109 - 120

 <p>Objekt 109</p>	<p>Elongation 40.906,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 39.176,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,97 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 39.169,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 110</p>	<p>Elongation 21.234,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 19.446,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,56 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 19.391,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 111</p>	<p>Elongation 21.254,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 20.116,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>9,90 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 20.116,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 112</p>	<p>Elongation 3.939,18 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.434,46 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,29 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 348,716 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.364,21 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>
 <p>Objekt 113</p>	<p>Elongation 66.664,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.817,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,90 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.817,1 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 114</p>	<p>Elongation 60.060,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 58.808 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,64 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 58.808 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 115</p>	<p>Elongation 74.263,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 68.873,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,78 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 68.838,3 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>	 <p>Objekt 116</p>	<p>Elongation 41.718,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 39.534,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,88 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 39.528,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 117</p>	<p>Elongation 67.376,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.444 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,17 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.438,6 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 118</p>	<p>Elongation 32.315,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 30.027,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>8,39 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 30.027,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 119</p>	<p>Elongation 26.010 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 24.318,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,00 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 24.318,9 <math>\mu\text{m}</math>  Teilstück Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 120</p>	<p>Elongation 5.849,76 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 5.072,59 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,97 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 311,901 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 5.069,51 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>


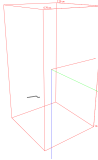
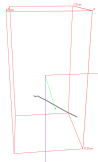
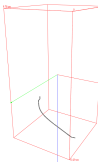
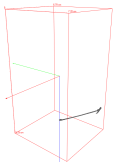
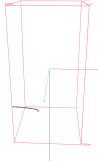
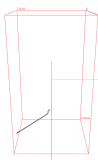
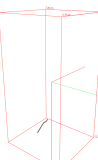
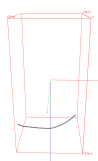

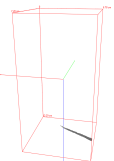

Tab. B.19: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 121 - 132

 <p>Objekt 121</p>	<p>Elongation 48.742,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 46.163 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,23 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 46.154,9 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 122</p>	<p>Elongation 3.704,78 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 2.860,75 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,99 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 467,852 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 2.348,7 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>
 <p>Objekt 123</p>	<p>Elongation 67.175 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.526,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,97 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.524,5 <math>\mu\text{m}</math>  Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 124</p>	<p>Elongation 13.461,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 12.656,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,04 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 12.656,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 125</p>	<p>Elongation 68.503,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 64.165,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,53 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 64.165,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 126</p>	<p>Elongation 113.315 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 60.714,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,00 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 58.472,7 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 127</p>	<p>Elongation 61.727,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 56.632,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,65 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 56.632,9 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 128</p>	<p>Elongation 61.269,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 54.832,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,09 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 54.822,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 129</p>	<p>Elongation 38.494,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 36.197,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,68 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 36.196,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 130</p>	<p>Elongation 4.519,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.375,53 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,32 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.139,17 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>
 <p>Objekt 131</p>	<p>Elongation 103.689 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 75.248,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,48 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 75.075,3 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>	 <p>Objekt 132</p>	<p>Elongation 67.097,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 65.047,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,20 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 65.043,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>

Tab. B.20: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 133 - 144

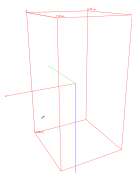

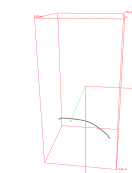

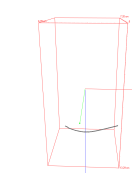

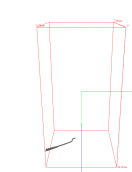

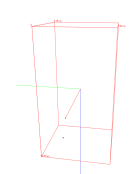

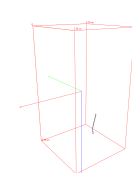
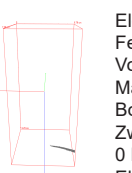
 <p>Objekt 133</p>	<p>Elongation 3.148,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 2.511 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,44 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 643,001 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 2.331,29 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 134</p>	<p>Elongation 34.566,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 33.771,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,38 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 33.771,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 135</p>	<p>Elongation 58.600,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 53.397,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,19 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 697,432 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 53.397,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 136</p>	<p>Elongation 40.999,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 38.813,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,79 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 38.806 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 137</p>	<p>Elongation 44.183,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 41.267,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,44 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 41.267,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 138</p>	<p>Elongation 13.812,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 10.095,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,44 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 10.095,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 139</p>	<p>Elongation 4.771,75 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 4.280,13 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,50 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.119,94 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 140</p>	<p>Elongation 38.476,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 37.971,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,62 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 37.970,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 141</p>	<p>Elongation 121.650 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 67.992,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>9,20 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 67.838,9 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (4 Fasern)  Dreidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 142</p>	<p>Elongation 11.280,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 10.678,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,47 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 10.648,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 143</p>	<p>Elongation 31.877,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 27.429,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,73 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 562,288 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 27.423,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 144</p>	<p>Elongation 43.371,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 41.677,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,95 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 41.674,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>

Tab. B.21: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 145 - 156

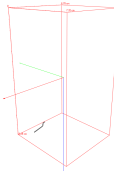

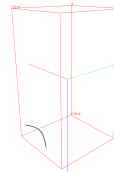
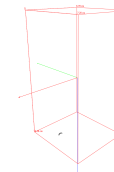
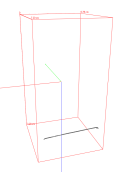
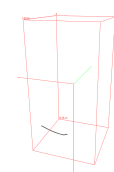
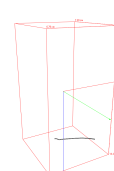
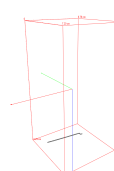
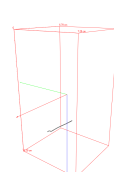

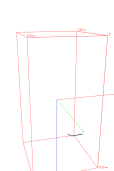
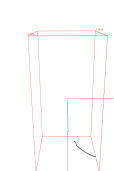
 <p>Objekt 145</p>	<p>Elongation 67.434,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 53.608,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,84 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 53.608,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper  Stark gebogen</p>	 <p>Objekt 146</p>	<p>Elongation 16.122,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 15.496,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,87 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 15.484,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 147</p>	<p>Elongation 54.862,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 53.038,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,40 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 53.034 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 148</p>	<p>Elongation 67.335,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 59.289,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,74 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 59.260,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  2 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 149</p>	<p>Elongation 75.716,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 69.678,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,54 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 69.666,4 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 150</p>	<p>Elongation 27.522 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 26.357,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,19 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 26.325,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 151</p>	<p>Elongation 48.332 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 46.187,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,22 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 46.177,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 152</p>	<p>Elongation 17.116,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 16.071,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,99 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 16.068,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 153</p>	<p>Elongation 69.536,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 61.238,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,84 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 61.238,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  2 Endaufbiegung im Probekörper  Stark verbogen</p>	 <p>Objekt 154</p>	<p>Elongation 39.465,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 38.280,9 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,42 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 643,001 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 38.279 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 155</p>	<p>Elongation 34.101,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 32.742,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,12 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 32.742,8 <math>\mu\text{m}</math>  Doppelt Geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 156</p>	<p>Elongation 46.248,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 44.066,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,94 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 44.039,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>



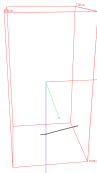
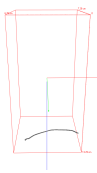
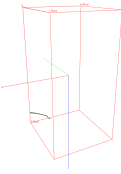
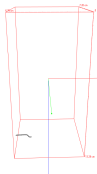
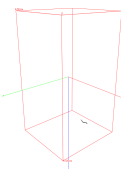
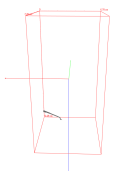
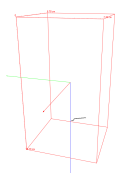
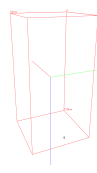
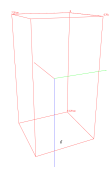
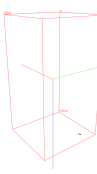
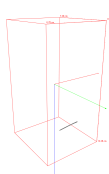
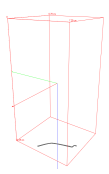
Tab. B.22: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 157 - 168

 <p>Objekt 157</p>	<p>Elongation 4.590,89 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 4.222,92 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,04 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.142,47 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 158</p>	<p>Elongation 75.429 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 42.552,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>4,00 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 38.771 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (3 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 159</p>	<p>Elongation 68.080,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 58.206,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,64 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 58.206,7 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Stark verbogen</p>	 <p>Objekt 160</p>	<p>Elongation 32.447 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 31.152,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,79 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 31.150,1 <math>\mu\text{m}</math>  Zweifach geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegungen im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 161</p>	<p>Elongation 65.323,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 58.923,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,22 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 697,432 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 58.923,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Stark verbogen</p>	 <p>Objekt 162</p>	<p>Elongation 52.904,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 48.415,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,64 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 43.360,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Stark verbogen</p>
 <p>Objekt 163</p>	<p>Elongation 32.504 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 31.095,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,95 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 31.095,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 164</p>	<p>Elongation 40.239,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 32.115,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,51 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 810,343 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 32.010,6 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (3 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>
 <p>Objekt 165</p>	<p>Elongation 1.650,53 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 1.759,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>5,22 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 1.469,2 <math>\mu\text{m}</math>  Einschluss</p>	 <p>Objekt 166</p>	<p>Elongation 38.550,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 36.351,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,66 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 36.351,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 167</p>	<p>Elongation 28.045 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 26.427,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,25 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 26.407 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 168</p>	<p>Elongation 29.964 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 28.952,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,00 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 28.943,8 <math>\mu\text{m}</math>  Zweifach geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegungen im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>

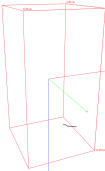

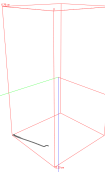
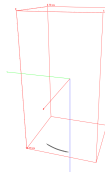


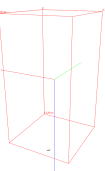

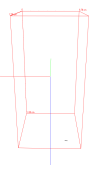

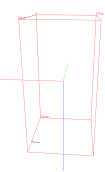
Tab. B.23: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 169 - 180

 <p>Objekt 169</p>	<p>Elongation 16.453,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 15.518,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,04 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 15.512,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 170</p>	<p>Elongation 32.242,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 27.730,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,99 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 679,773 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 25.776,2 <math>\mu\text{m}</math>  Berührende Fasern (ca. 2 Fasern)  Zweidimensionale Anordnung</p>
 <p>Objekt 171</p>	<p>Elongation 42.892,4 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 38.285,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,66 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 38.281,1 <math>\mu\text{m}</math>  Doppelt geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegung im Probekörper  Ebenenschnitt <sup>1)</sup></p>	 <p>Objekt 172</p>	<p>Elongation 5.021,17 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 4.257,34 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,04 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.145,71 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 173</p>	<p>Elongation 66.042 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 58.966,3 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,58 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 643,001 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 58.966,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 174</p>	<p>Elongation 34.576,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 31.652 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,21 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 31.643,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 175</p>	<p>Elongation 52.455,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.757,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,99 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.718,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 176</p>	<p>Elongation 44.807,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 43.073,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,55 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 562,288 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 43.116 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 177</p>	<p>Elongation 41.091,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 39.258,5 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,47 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 562,288 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 39.254,8 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 178</p>	<p>Elongation 45.022 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 40.798,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,77 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 441,095 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 40.787,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 179</p>	<p>Elongation 19.477,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 18.069,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>8,47 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 697,432 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 18.054,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 180</p>	<p>Elongation 33.433 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 31.284 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,49 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 31.284 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser, gebogen  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>

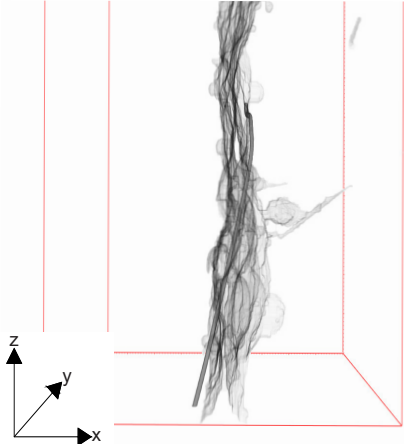
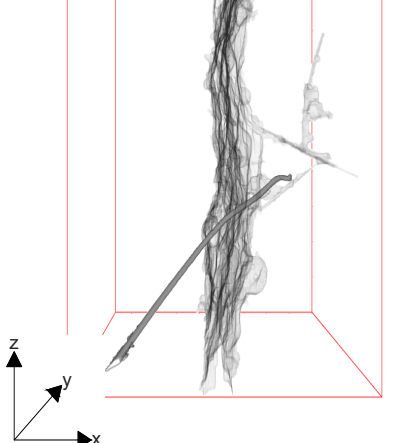
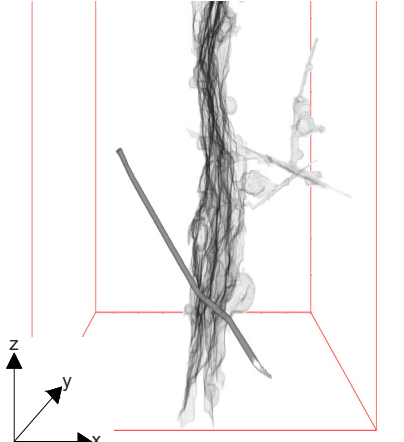
Tab. B.24: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 181 - 192

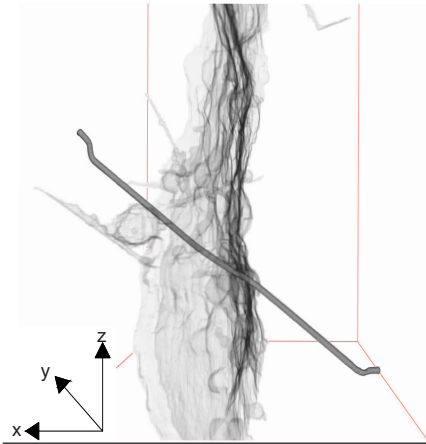
 <p>Objekt 181</p>	<p>Elongation 42.208,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 40.225,4 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,61 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 643,001 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 40.222,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 182</p>	<p>Elongation 65.242,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 59.344,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,19 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 59.328,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Gebogen</p>
 <p>Objekt 183</p>	<p>Elongation 27.562,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 25.757,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,21 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 731,473 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 25.745,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 184</p>	<p>Elongation 17.461,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 16.424,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,44 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 583,514 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 16.327,6 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 185</p>	<p>Elongation 13.199,1 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 11.154 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,64 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 467,852 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 11.027 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 186</p>	<p>Elongation 28.491,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 26.894,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,52 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 26.894,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 187</p>	<p>Elongation 22.829,5 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 20.556,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>7,13 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 540,229 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 20.553,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 188</p>	<p>Elongation 3.541,84 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.464,42 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,30 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.439,28 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 189</p>	<p>Elongation 6.063,94 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 4.690,2 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,17 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.571,57 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 190</p>	<p>Elongation 4.471,12 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.744,44 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,62 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 714,655 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.554,36 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 191</p>	<p>Elongation 26.402 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 25.375,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,12 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 25.443,7 <math>\mu\text{m}</math>  Doppelt geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegungen im Probekörper</p>	 <p>Objekt 192</p>	<p>Elongation 47.298,7 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 44.230,1 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,06 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 44.230,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper  Gebogen</p>

Tab. B.25: Zusammenstellung der ermittelten Objekteigenschaften, Objekt 193 - 203

 <p>Objekt 193</p>	<p>Elongation 16.890,8 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 15.865,6 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,82 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 697,432 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 15.864,3 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 194</p>	<p>Elongation 4.277,82 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.700,34 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,14 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 643,001 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.551,4 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 195</p>	<p>Elongation 51.192,6 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 49.515 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,10 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 998,571 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 49.514,1 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>	 <p>Objekt 196</p>	<p>Elongation 33.949,3 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 32.479 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>1,33 \cdot 10^{10} \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 763,999 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 32.473,5 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 197</p>	<p>Elongation 5.870,44 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 5.545,57 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>2,83 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 5.524,26 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 198</p>	<p>Elongation 20.169,2 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 18.776,8 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,28 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 795,195 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 18.771 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  1 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 199</p>	<p>Elongation 4.224,57 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.707,72 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>9,14 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 467,852 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.695,25 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 200</p>	<p>Elongation 4.758,29 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 4.442,54 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,07 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 441,095 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 4.310,65 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>
 <p>Objekt 201</p>	<p>Elongation 3.469,9 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 3.448,59 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>3,79 \cdot 10^8 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 623,802 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 3.446,03 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  Kleines Teilstück der Faser</p>	 <p>Objekt 202</p>	<p>Elongation 22.762 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 22.116,7 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>9,13 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 562,288 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 22.116,2 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegung im Probekörper</p>
 <p>Objekt 203</p>	<p>Elongation 9.958,07 <math>\mu\text{m}</math>  Feret Diameter 9.594,45 <math>\mu\text{m}</math>  Volumen <math>6,39 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3</math>  Max. local thickness 779,753 <math>\mu\text{m}</math>  Bounding Box length 9.586,51 <math>\mu\text{m}</math>  Geschnittene Einzelfaser  0 Endaufbiegung im Probekörper</p>		

### **B.3      Visualisierung der 44 rissquerenden Fasern**

	<p><b>Label 1</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert</p> $\eta_x = 0,24$ $\eta_y = 0,40$ $\eta_z = 0,84$ <p>Höhenlage [mm]</p> $h = 24,6$ <p>Verformungsfaktor</p> $\delta^f = 0,97$ <p>Einbindelängen [mm]</p> $l_1 = 18,4$ $l_2 = 14,8$ $l_m = 30,7$ $l'_1 = 22,5$ $l'_2 = \textcircled{1}$
	<p><b>Label 2</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert</p> $\eta_x = 0,79$ $\eta_y = 0,20$ $\eta_z = 0,51$ <p>Höhenlage [mm]</p> $h = 25,9$ <p>Verformungsfaktor</p> $\delta^f = 0,97$ <p>Einbindelängen [mm]</p> $l_1 = 38,9$ $l_2 = 11,4$ $l_m = 4,7$ $l'_1 = 51,9$ $l'_2 = \textcircled{4}$
	<p><b>Label 3</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert</p> $\eta_x = 0,68$ $\eta_y = 0,22$ $\eta_z = 0,64$ <p>Höhenlage [mm]</p> $h = 15,8$ <p>Verformungsfaktor</p> $\delta^f = 0,97$ <p>Einbindelängen [mm]</p> $l_1 = 13,6$ $l_2 = 28,1$ $l_m = 7,4$ $l'_1 = 32,5$ $l'_2 = \textcircled{3}$



**Label 4**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,82$$

$$\eta_y = 0,04$$

$$\eta_z = 0,49$$

Höhenlage [mm]

$$h = 22,7$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]

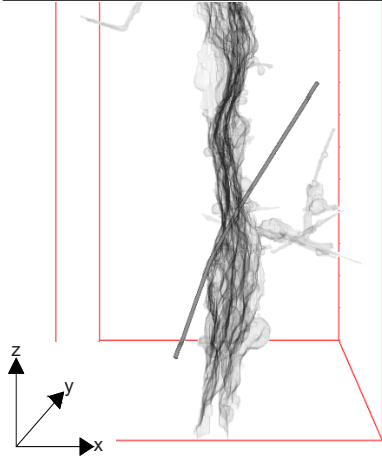
$$l_1 = 30,9$$

$$l_2 = 30,6$$

$$l_m = 11,1$$

$$l'_1 = \textcircled{3}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 5**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,50$$

$$\eta_y = 0,19$$

$$\eta_z = 0,79$$

Höhenlage [mm]

$$h = 33,6$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,96$$

Einbindelängen [mm]

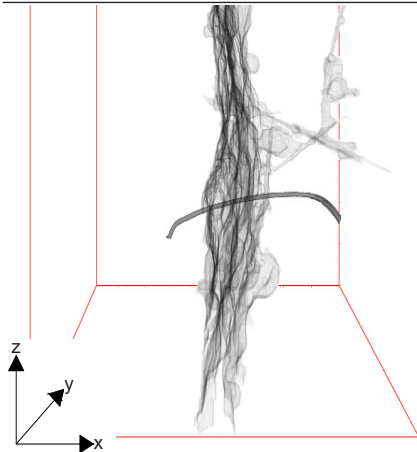
$$l_1 = 24,4$$

$$l_2 = 33,3$$

$$l_m = 12,6$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 6**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,89$$

$$\eta_y = 0,11$$

$$\eta_z = 0,15$$

Höhenlage [mm]

$$h = 17,1$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,92$$

Einbindelängen [mm]

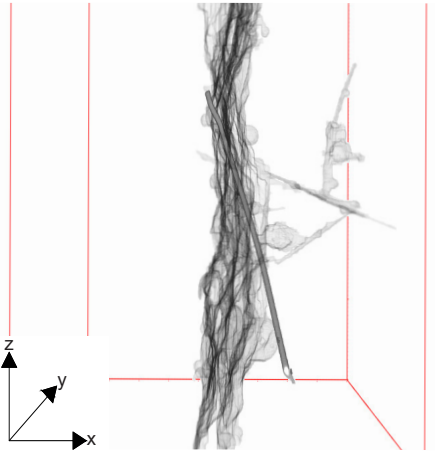
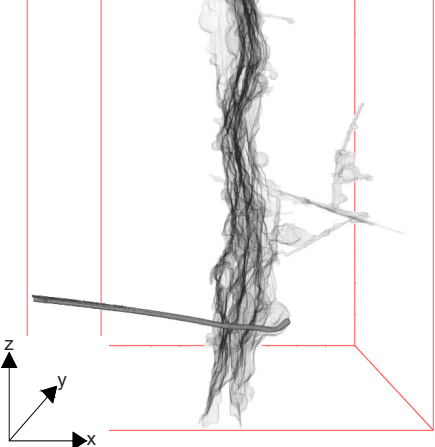
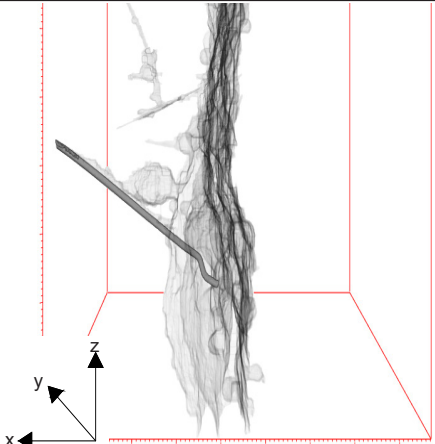
$$l_1 = 24,0$$

$$l_2 = 27,3$$

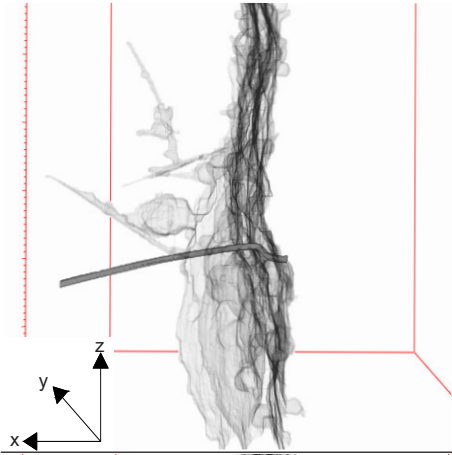
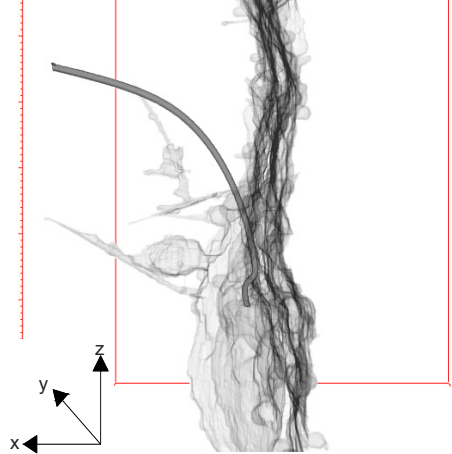
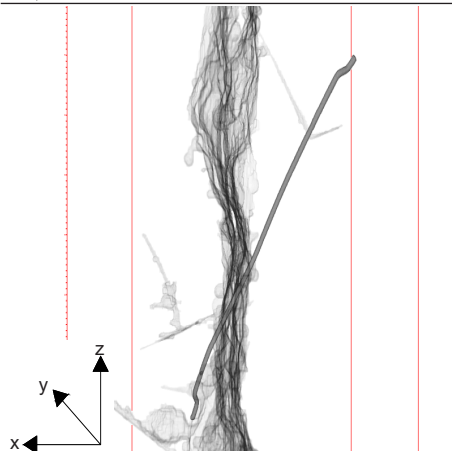
$$l_m = 15,0$$

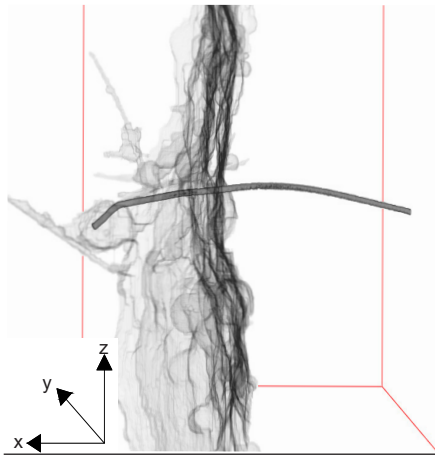
$$l'_1 = \textcircled{4}$$

$$l'_2 = 28,9$$

	<p><b>Label 7</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert</p> $\eta_x = 0,34$ $\eta_y = 0,37$ $\eta_z = 0,83$ <p>Höhenlage [mm]</p> $h = 33,7$ <p>Verformungsfaktor</p> $\delta^f = 0,98$ <p>Einbindelängen [mm]</p> $l_1 = 16,9$ $l_2 = 8,9$ $l_m = 23,4$ $l'_1 = 35,7$ $l'_2 = \textcircled{1}$
	<p><b>Label 8</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert</p> $\eta_x = 0,96$ $\eta_y = 0,07$ $\eta_z = 0,13$ <p>Höhenlage [mm]</p> $h = 15,7$ <p>Verformungsfaktor</p> $\delta^f = 0,98$ <p>Einbindelängen [mm]</p> $l_1 = 6,7$ $l_2 = 35,0$ $l_m = 5,3$ $l'_1 = \textcircled{4}$ $l'_2 = 56,0$
	<p><b>Label 9</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert</p> $\eta_x = 0,82$ $\eta_y = 0,09$ $\eta_z = 0,48$ <p>Höhenlage [mm]</p> $h = 17,4$ <p>Verformungsfaktor</p> $\delta^f = 0,96$ <p>Einbindelängen [mm]</p> $l_1 = 1,2$ $l_2 = 31,5$ $l_m =$ $l'_1 = \textcircled{1}$ $l'_2 = 59,2$



	<p><b>Label 10</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,95</math>  <math>\eta_y = 0,14</math>  <math>\eta_z = 0,16</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 22,9</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,96</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 30,3</math>  <math>l_2 = 2,0</math>  <math>l_m = 8,1</math>  <math>l'_1 = 57,9</math>  <math>l'_2 = \textcircled{3}</math></p>
	<p><b>Label 11</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,58</math>  <math>\eta_y = 0,10</math>  <math>\eta_z = 0,64</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 26,7</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,87</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 5,0</math>  <math>l_2 = 43,6</math>  <math>l_m = 8,1</math>  <math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = 54,9</math></p> <p>Bemerkung:  Es wird nur eine Rissflanke durchdrungen</p>
	<p><b>Label 12</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,53</math>  <math>\eta_y = 0,17</math>  <math>\eta_z = 0,79</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 44,2</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,98</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 16,4</math>  <math>l_2 = 40,6</math>  <math>l_m = 13,7</math>  <math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = \textcircled{1}</math></p>



#### Label 13

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,87$$

$$\eta_y = 0,34$$

$$\eta_z = 0,10$$

Höhenlage [mm]

$$h = 32,6$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,95$$

Einbindelängen [mm]

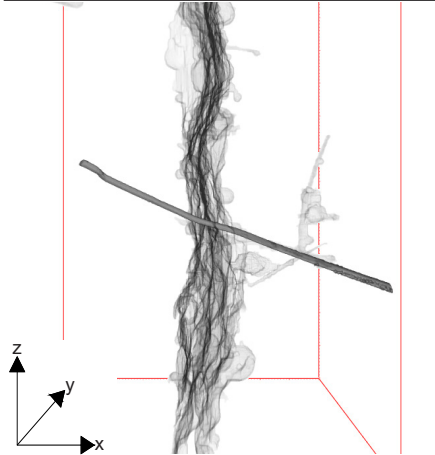
$$l_1 = 17,3$$

$$l_2 = 40,0$$

$$l_m = 6,5$$

$$l'_1 = ④$$

$$l'_2 = 44,2$$



#### Label 14

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,90$$

$$\eta_y = 0,09$$

$$\eta_z = 0,34$$

Höhenlage [mm]

$$h = 38,5$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]

$$l_1 = 30,9$$

$$l_2 = 24,9$$

$$l_m = 7,2$$

$$l'_1 = 35,9$$

$$l'_2 = ①$$



#### Label 15

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,67$$

$$\eta_y = 0,33$$

$$\eta_z = 0,62$$

Höhenlage [mm]

$$h = 52,8$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]

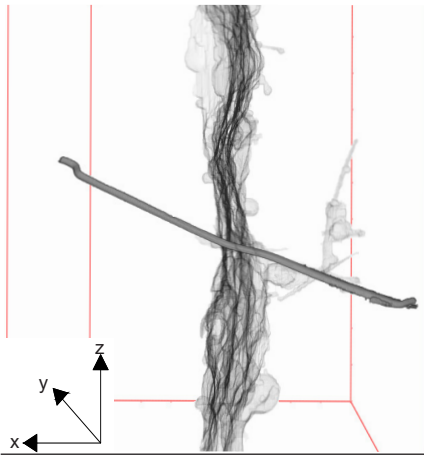
$$l_1 = 35,2$$

$$l_2 = 29,7$$

$$l_m = 7,2$$

$$l'_1 = ①$$

$$l'_2 = ③$$



**Label 16**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,87$$

$$\eta_y = 0,11$$

$$\eta_z = 0,29$$

Höhenlage [mm]

$$h = 37,9$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,93$$

Einbindelängen [mm]

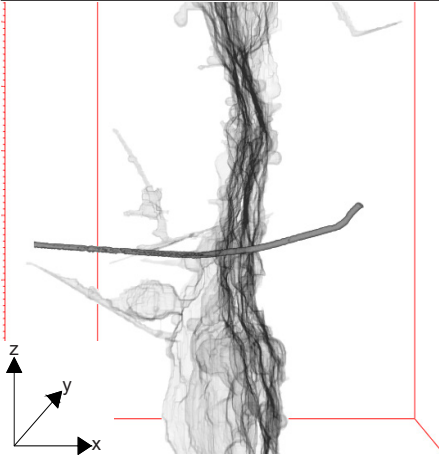
$$l_1 = 31,5$$

$$l_2 = 35,5$$

$$l_m = 6,3$$

$$l'_1 = \textcircled{4}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 17**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,93$$

$$\eta_y = 0,12$$

$$\eta_z = 0,14$$

Höhenlage [mm]

$$h = 34,2$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,96$$

Einbindelängen [mm]

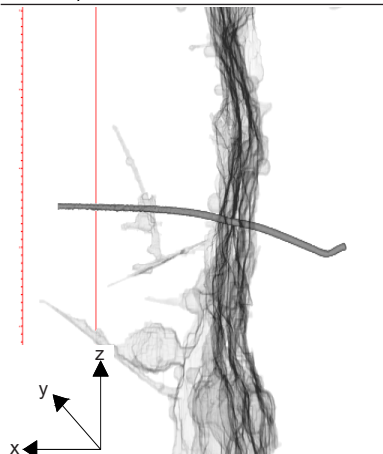
$$l_1 = 30,6$$

$$l_2 = 19,2$$

$$l_m = 5,7$$

$$l'_1 = 43,1$$

$$l'_2 = \textcircled{4}$$



**Label 18**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,67$$

$$\eta_y = 0,33$$

$$\eta_z = 0,62$$

Höhenlage [mm]

$$h = 52,8$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]


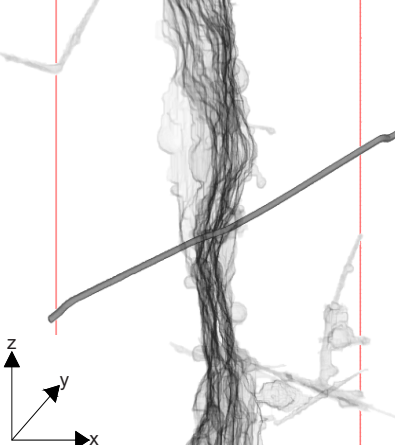

$$l_1 = 35,2$$

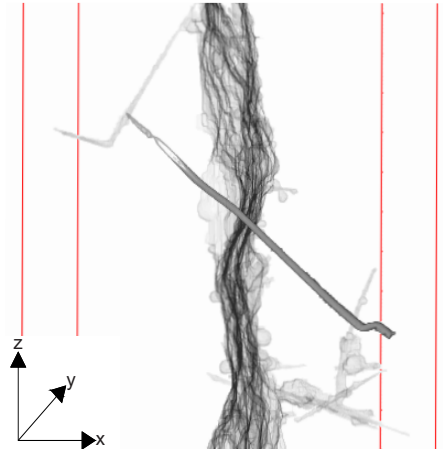
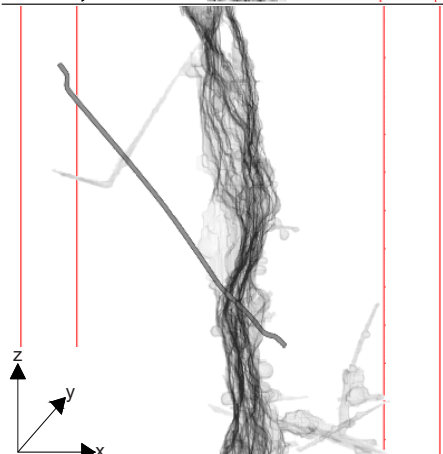
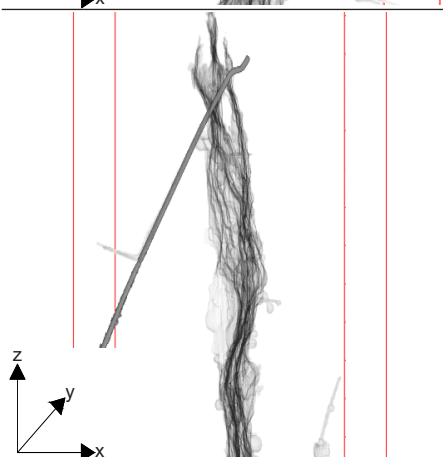
$$l_2 = 29,7$$

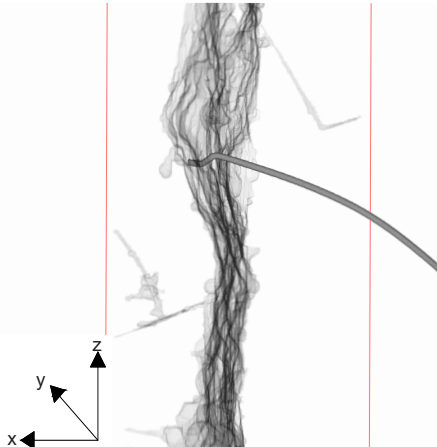

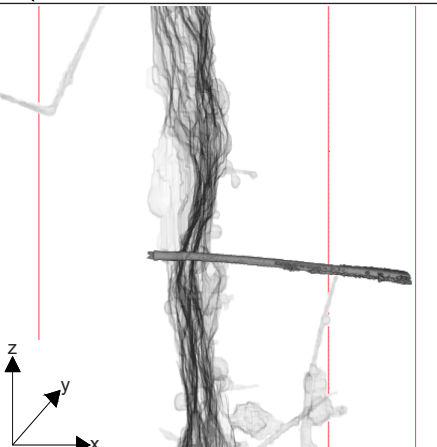
$$l_m = 3,8$$

$$l'_1 = \textcircled{4}$$

$$l'_2 = 45,9$$

	<p><b>Label 19</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,83</math>  <math>\eta_y = 0,11</math>  <math>\eta_z = 0,49</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 56,6</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,96</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 31,9</math>  <math>l_2 = 33,7</math>  <math>l_m = 4,5</math></p> <p><math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = \textcircled{3}</math></p>
	<p><b>Label 20</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,85</math>  <math>\eta_y = 0,20</math>  <math>\eta_z = 0,40</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 53,7</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,96</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 28,3</math>  <math>l_2 = 35,9</math>  <math>l_m = 5,1</math></p> <p><math>l'_1 = \textcircled{3}</math>  <math>l'_2 = \textcircled{1}</math></p>
	<p><b>Label 21</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,71</math>  <math>\eta_y = 0,23</math>  <math>\eta_z = 0,31</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 60,9</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,79</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 26,7</math>  <math>l_2 = 35,3</math>  <math>l_m = 7,1</math></p> <p><math>l'_1 = \textcircled{3}</math>  <math>l'_2 = -</math></p>

	<p><b>Label 22</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,78</math>  <math>\eta_y = 0,06</math>  <math>\eta_z = 0,57</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 65,8</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,96</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 35,7</math>  <math>l_2 = 17,6</math>  <math>l_m = 6,4</math></p> <p><math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = 26,0</math></p>
	<p><b>Label 23</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,64</math>  <math>\eta_y = 0,06</math>  <math>\eta_z = 0,73</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 53,8</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,99</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 10,5</math>  <math>l_2 = 52,8</math>  <math>l_m = 6,3</math></p> <p><math>l'_1 = \textcircled{1} \textcircled{3}</math>  <math>l'_2 = \textcircled{1}</math></p>
	<p><b>Label 24</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,54</math>  <math>\eta_y = 0,10</math>  <math>\eta_z = 0,78</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 97,0</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,97</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 57,9</math>  <math>l_2 = 10,3</math>  <math>l_m = 6,9</math></p> <p><math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = \textcircled{1}</math></p>

	<p><b>Label 25</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,90</math>  <math>\eta_y = 0,07</math>  <math>\eta_z = 0,35</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 66,5</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,97</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 43,4</math>  <math>l_2 = 2,3</math>  <math>l_m = 3,2</math>  <math>l'_1 = 62,2</math>  <math>l'_2 = \textcircled{1}</math></p>
	<p><b>Label 26</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,94</math>  <math>\eta_y = 0,11</math>  <math>\eta_z = 0,12</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 53,9</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,97</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 32,8</math>  <math>l_2 = 14,1</math>  <math>l_m = 2,9</math>  <math>l'_1 = 50,9</math>  <math>l'_2 = \textcircled{3}</math></p>
	<p><b>Label 27</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,94</math>  <math>\eta_y = 0,14</math>  <math>\eta_z = 0,08</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 57,9</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,97</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 34,4</math>  <math>l_2 = 3,2</math>  <math>l_m = 5,3</math>  <math>l'_1 = 59,5</math>  <math>l'_2 = \textcircled{1}</math></p>



**Label 28**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,58$$

$$\eta_y = 0,51$$

$$\eta_z = 0,49$$

Höhenlage [mm]

$$h = 79,2$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,93$$

Einbindelängen [mm]

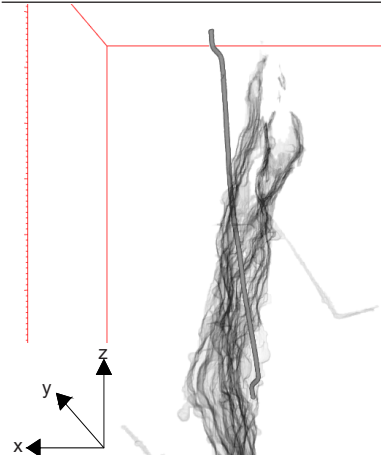
$$l_1 = 36,9$$

$$l_2 = 28,1$$

$$l_m = 7,8$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 29**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,14$$

$$\eta_y = 0,22$$

$$\eta_z = 0,95$$

Höhenlage [mm]

$$h = 92,5$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,99$$

Einbindelängen [mm]

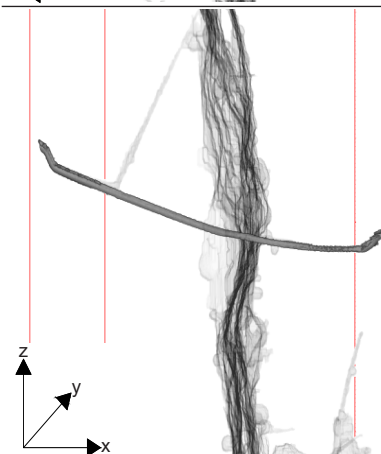
$$l_1 = 29,9$$

$$l_2 = 32,3$$

$$l_m = 9,7$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 30**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,92$$

$$\eta_y = 0,11$$

$$\eta_z = 0,20$$

Höhenlage [mm]

$$h = 67,4$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,96$$

Einbindelängen [mm]

$$l_1 = 27,0$$

$$l_2 = 37,9$$

$$l_m = 3,8$$

$$l'_1 = \textcircled{3} \textcircled{4}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



#### Label 31

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,93$$

$$\eta_y = 0,13$$

$$\eta_z = 0,14$$

Höhenlage [mm]

$$h = 66,7$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,96$$

Einbindelängen [mm]

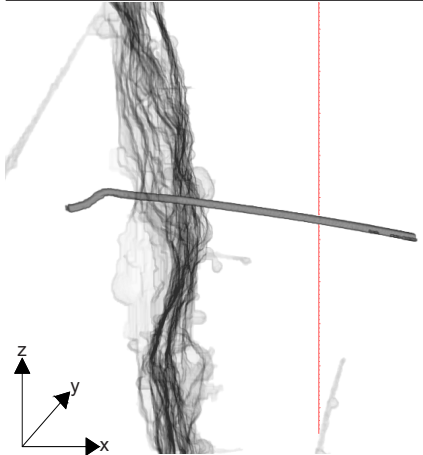
$$l_1 = 8,3$$

$$l_2 = 16,0$$

$$l_m = 2,9$$

$$l'_1 = 49,1$$

$$l'_2 = \textcircled{3} \textcircled{4}$$



#### Label 32

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,93$$

$$\eta_y = 0,19$$

$$\eta_z = 0,11$$

Höhenlage [mm]

$$h = 73,3$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]

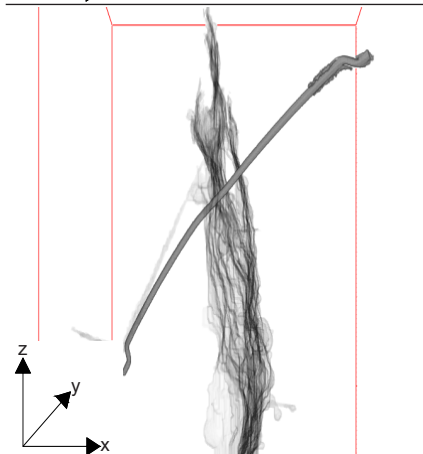
$$l_1 = 35,8$$

$$l_2 = 10,2$$

$$l_m = 3,6$$

$$l'_1 = 54,2$$

$$l'_2 = \textcircled{3}$$



#### Label 33

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,70$$

$$\eta_y = 0,39$$

$$\eta_z = 0,51$$

Höhenlage [mm]

$$h = 90,8$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,96$$

Einbindelängen [mm]

$$l_1 = 33,8$$

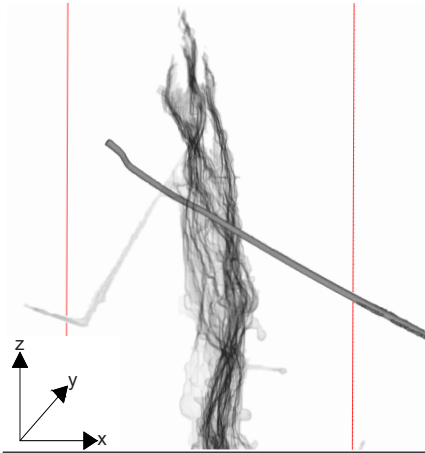
$$l_2 = 34,2$$

$$l_m = 2,7$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$





**Label 34**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,85$$

$$\eta_y = 0,05$$

$$\eta_z = 0,44$$

Höhenlage [mm]

$$h = 88,9$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]

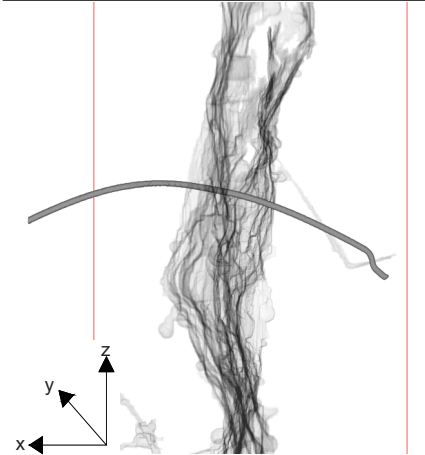
$$l_1 = 42,9$$

$$l_2 = 16,5$$

$$l_m = 2,7$$

$$l'_1 = 48,7$$

$$l'_2 = \textcircled{1} \textcircled{3}$$



**Label 35**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,90$$

$$\eta_y = 0,10$$

$$\eta_z = 0,23$$

Höhenlage [mm]

$$h = 83,9$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,94$$

Einbindelängen [mm]

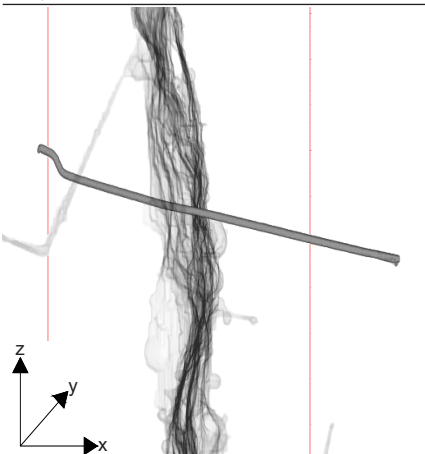
$$l_1 = 29,7$$

$$l_2 = 30,6$$

$$l_m = 2,7$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = 35,6$$



**Label 36**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,95$$

$$\eta_y = 0,14$$

$$\eta_z = 0,22$$

Höhenlage [mm]

$$h = 78,2$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 1,00$$

Einbindelängen [mm]

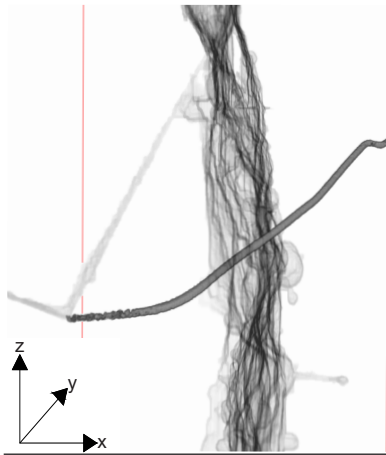
$$l_1 = 34,0$$

$$l_2 = 25,5$$

$$l_m = 4,9$$

$$l'_1 = 37,6$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 37**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,73$$

$$\eta_y = 0,45$$

$$\eta_z = 0,29$$

Höhenlage [mm]

$$h = 77,8$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,91$$

Einbindelängen [mm]

$$l_1 = 28,5$$

$$l_2 = 30,5$$

$$l_m = 3,8$$

$$l'_1 = 33,7$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 38**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,85$$

$$\eta_y = 0,25$$

$$\eta_z = 0,36$$

Höhenlage [mm]

$$h = 91,1$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,97$$

Einbindelängen [mm]

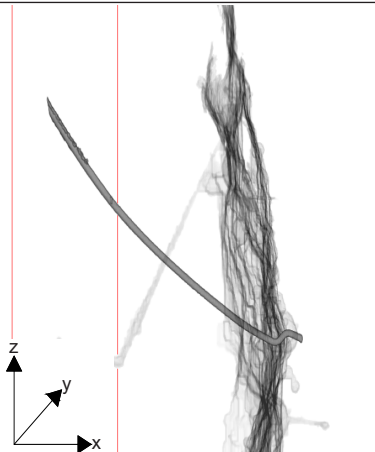
$$l_1 = 45,7$$

$$l_2 = 20,3$$

$$l_m = 2,2$$

$$l'_1 = -$$

$$l'_2 = \textcircled{1}$$



**Label 39**

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,78$$

$$\eta_y = 0,19$$

$$\eta_z = 0,50$$

Höhenlage [mm]

$$h = 74,9$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,96$$

Einbindelängen [mm]

$$l_1 = 2,8$$

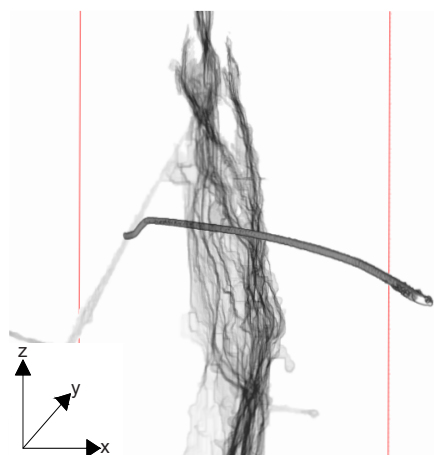
$$l_2 = 47,4$$

$$l_m = 7,9$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = 57,3$$

	<p><b>Label 40</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,86</math>  <math>\eta_y = 0,24</math>  <math>\eta_z = 0,39</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 94,0</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,97</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 45,5</math>  <math>l_2 = 9,4</math>  <math>l_m = 2,2</math>  <math>l'_1 = 56,4</math>  <math>l'_2 = \textcircled{3}</math></p>
	<p><b>Label 41</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,87</math>  <math>\eta_y = 0,29</math>  <math>\eta_z = 0,23</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 88,4</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 0,96</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 39,4</math>  <math>l_2 = 25,7</math>  <math>l_m = 3,2</math>  <math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = \textcircled{3}</math></p>
	<p><b>Label 42</b></p> <p>Faserorientierungsbeiwert  <math>\eta_x = 0,97</math>  <math>\eta_y = 0,05</math>  <math>\eta_z = 0,16</math></p> <p>Höhenlage [mm]  <math>h = 80,0</math></p> <p>Verformungsfaktor  <math>\delta^f = 1,00</math></p> <p>Einbindelängen [mm]  <math>l_1 = 2,9</math>  <math>l_2 = 28,6</math>  <math>l_m = 3,8</math>  <math>l'_1 = \textcircled{1}</math>  <math>l'_2 = 35,6</math></p>



#### Label 43

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,71$$

$$\eta_y = 0,57$$

$$\eta_z = 0,16$$

Höhenlage [mm]

$$h = 85,8$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,93$$

Einbindelängen [mm]

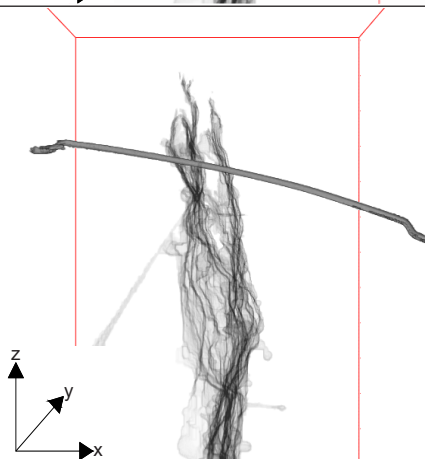
$$l_1 = 35,5$$

$$l_2 = 20,7$$

$$l_m = 4,3$$

$$l'_1 = 43,0$$

$$l'_2 = \textcircled{3}$$



#### Label 44

Faserorientierungsbeiwert

$$\eta_x = 0,90$$

$$\eta_y = 0,16$$

$$\eta_z = 0,21$$

Höhenlage [mm]

$$h = 103,0$$

Verformungsfaktor

$$\delta^f = 0,94$$

Einbindelängen [mm]

$$l_1 = 41,0$$

$$l_2 = 28,4$$

$$l_m = 1,6$$

$$l'_1 = \textcircled{1}$$

$$l'_2 = \textcircled{1} \textcircled{3}$$

## Lebenslauf des Verfassers

### Persönliche Daten

Name	Frank Schuler
Staatsangehörigkeit	deutsch

### Beruflicher Werdegang

2004 - 2005	Heberger Bau GmbH Bauleitung bei der Baumaßnahme Military Community Center (KMCC), Air Base Ramstein
2005 – 2008	Hochschule Kaiserslautern Wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Fachgebieten Massivbau (Prof. Bindseil), Grundbau (Prof. Dr. Tausch) und Vermessungskunde
2008 - 2014	Technische Universität Kaiserslautern Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion bei Prof. Dr.-Ing. Schnell sowie im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen bei Prof. Dr.-Ing. Breit
2014 - 2019	Technische Universität Kaiserslautern Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen bei Prof. Dr.-Ing. Breit
seit 2020	bsm <sup>2</sup> GmbH, Ingenieurgesellschaft Breit – Schuler – Merkel Geschäftsführender Gesellschafter

### Ausbildung

1992	Mittlere Reife
1992 - 1995	Ausbildung zum Bauzeichner im konstruktiven Ingenieurbau
1995 - 1996	Fachhochschulreife (Fachabitur)
1996 - 1997	Zivildienst
1997 - 2004	Studium an der Hochschule Kaiserslautern Studienrichtung: Bauingenieurwesen Fachrichtung: Konstruktiver Ingenieurbau
2007 - 2009	Studium an der Hochschule Kaiserslautern Technische Akademie Süd-West Studienrichtung: Bauingenieurwesen Fachrichtung: Bauschäden, Baumängel und Instandsetzungsplanung